

**INSTITUTO AGRONÔMICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA
TROPICAL E SUBTROPICAL**

**BIOCARVÃO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS
E PRODUTIVIDADE DO MILHO EM SOLO SOB
CLIMA TROPICAL**

ISABELLA MENUZZO LUCON

**Orientadora: Dra. Aline Renée Coscione
Coorientador: Dr. Cristiano Alberto de Andrade**

Tese apresentada como requisito para obtenção
do título de **Doutora** em Agricultura Tropical e
Subtropical, Área de Concentração em Gestão
de Recursos Agroambientais

Campinas - SP

2019

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Ficha elaborada pela bibliotecária do Núcleo de Informação e Documentação do Instituto Agronômico

L941b Lucon, Isabella Menuzzo

Biocarvão nos atributos físicos, químicos e produtividade do milho em solo sob clima tropical / Isabella Menuzzo Lucon. Campinas, 2019. 92 fls.

Orientadora: Aline Renée Coscione

Coorientador: Cristiano Alberto de Andrade

Tese (Doutorado) Agricultura Tropical e Subtropical – Instituto Agronômico

1 Biocarvão 2. Produção do milho – Solo sob Clima Tropical

3. Matéria orgânica do solo 4. Estoque de carbono 5. Isótopos de carbono

I. Coscione, Aline Renée II. Andrade, Cristiano Alberto de III. Título

CDD. 631.44



SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO
AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA
DOS AGRONEGÓCIOS
INSTITUTO AGRONÔMICO
Pós-Graduação
Av. Barão de Itapira, 1481 Caixa Postal 28
13001-970 Campinas, SP - Brasil
(19) 2137-0601
pgiac@iac.sp.gov.br



Programa de Pós-Graduação
Agricultura Tropical e Subtropical

Certificado de Aprovação de Defesa de Tese

"Biocarvão nos atributos físicos, químicos e produtividade do milho em solo sob clima tropical"

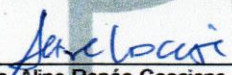
Aluna: Isabella Menuzzo Lucon

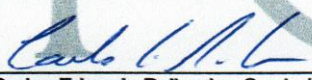
Área de Concentração: Gestão de Recursos Agroambientais

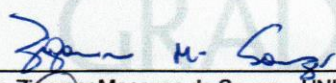
Processo SAA n.º: 4.900/2015

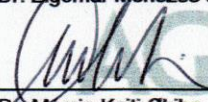
Orientadora: Dra. Aline Renée Coscione

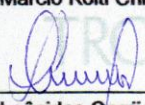
Aprovada pela banca examinadora:


Dra. Aline Renée Coscione - IAC


Dr. Carlos Eduardo Pellegrino Cerri - USP/ESALQ


Dr. Zígonar Menezes de Souza - UNICAMP


Dr. Márcio Koiti Chiba - IAC


Dr. Leônidas Carrijo Azevedo Melo - UFLA

INSTITUTO
AGRONÔMICO

Campinas, 19 de junho de 2019


Gabriel C. Blair
Coordenador
Pós Graduação
Instituto Agrônomo

A Cristo Jesus

Porque dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas.

DEDICO

*Aos meus pais, irmãos, cunhados e sobrinhos,
pelo encorajamento, paciência, incentivo e orações.
À minha família da Comunidade Esperança e Vila Nova,
pelo amor de Deus demonstrado e pelo apoio.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

- A Deus, que em todo tempo foi a minha força, me ajudando e capacitando a chegar até aqui;
- À Pós-graduação do Instituto Agronômico pela oportunidade;
- À Dra. Aline Reneé Coscione, que me orientou, incentivou e corrigiu;
- Ao Dr. Cristiano Alberto de Andrade, pela ajuda nas coletas, análises estatísticas, ensinamentos e orientação;
- À Dra. Isabella Clerici De Maria, Dr. Márcio Chiba, Dr. Otávio de Camargo, Dr. Ricardo Coelho, Dra. Cleide Abreu, Dr. Heitor Cantarella, Dr. Luiz Teixeira, Dr. Ronaldo Berton, Dra. Mônica Abreu, Dra. Aline Puga, Dr. Matheus Cipriano, Dr. Estevão, Dra. Adriana Parada: meu doutorado foi desenvolvido com tudo o que aprendi com vocês, obrigada!
- Ao Dr. Wellington da Silva Guimarães Júnnyor, pelas correções e críticas, pelas risadas, brigas; pela ajuda nas coletas, nas análises, nas interpretações dos dados e, especialmente, agradeço pela sua amizade;
- Aos meus amigos que muito me ajudaram nas coletas, análises, discussões sobre agronomia e amizade que levarei comigo sempre: Brenner, Caio César Zitto Siqueira, Camila Cassante, Jessica Zuanazzi, Marcelo Andriosi, Amabile, Rodrigo Moreira e Ruan Carnier, Stefany Nunes, Karen;
- Aos técnicos do Laboratório de Análise de Resíduos e Fertilizantes: Luciana Taminato, Douglas, Janete, Giovana;
- Às secretárias da Qualidade do solo: Silvia Bandone e Sandrinha pela amizade e apoio;
- À Celia Terra que sempre me ajudou e socorreu;
- Ao Osvaldo Nunes de Freitas, Flavio Luiz de Abreu, Marco Antonio Damico, Messias Pereira de Souza, Walter Hélio de Mattos e todos os funcionários da Fazenda Santa Elisa, sem vocês, não haveria como desenvolver um experimento de campo;
- Ao Antonio Ribeiro de Sousa, à Maria Elizabete Alves de Freitas e à Ruth Fazio Rodrigues, que tiveram toda paciência neste finalzinho de projeto;
- Ao meu pai e minha mãe, aos meus irmãos Max Henrique e Mariana e minha cunhada Raquel e meu cunhado Neto, que sempre estiveram presentes;
- Aos meus sobrinhos, Pedro e Helena, que arrancaram sorrisos meus mesmo quando as preocupações e ansiedade eram enormes;
- À Marga, Fer, Luana e Ray, além de amigas, minhas líderes que me fizeram crescer e confiaram em mim; Mi e Roxy, pela amizade divertida e risadas sem fim;
- À todas as pessoas, que de uma forma ou de outra, me ajudaram para a realização deste trabalho e não estão listadas acima, meu sincero obrigada!!!

BIOGRAFIA

Isabella Menuzzo Lucon - nascida em Santo Antonio de Posse/SP em 31 de maio de 1981, primeira filha de Max Sebastião Antonio Lucon e Olga Maria Menuzzo Lucon, irmã de Max Henrique Menuzzo Lucon e Mariana Menuzzo Lucon Duarte. Graduada em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) em fevereiro de 2008, estagiou na área de mecanização agrícola na Usina São Martinho, Pradópolis/SP. Foi professora de matemática para ensino médio de no ano de 2009, iniciando em março de 2010 o Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical (Gestão de Recursos Agroambientais – Poluição e Qualidade do Solo) no Instituto Agronômico, Campinas/SP, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) nos 12 meses finais do curso. Em abril de 2012 obteve o título de Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical. Em março de 2015 iniciou o Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical (Gestão de Recursos Agroambientais – Poluição e Qualidade do Solo) no Instituto Agronômico, Campinas/SP, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) nos 36 meses iniciais do curso. Durante esse período, realizou seis meses de estágio docência em Química Geral na Faculdade Tecnológica (Fatec Campinas) no curso Superior de Tecnólogo em Processos Químicos e seis meses de estágio docência em Características e Propriedades do Solo na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Foi representante discente de outubro de 2015 a novembro de 2016, participou da organização do II Curso de Férias do IAC em 2015 e da recepção de alunos de ensino médio em visita técnica sobre Relevo, Solos, Biomas e Conservação do Solo no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico (Fazenda Santa Elisa). Participou de cursos e congressos, com apresentação de dados obtidos tanto no Mestrado como no Doutorando, destacando a apresentação oral do trabalho intitulado “Eucalyptus biochar soil fertility and corn yield on a long term field experiment” no 21st World Congress of Soil Science, Rio de Janeiro – Brasil.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESES E OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1. Carvão vegetal, biocarvão e seu uso agrícola	7
3.2 Biocarvão e a matéria orgânica do solo.....	8
3.3 Biocarvão e fertilidade solo	10
3.4 Biocarvão e atributos físicos do solo (capacidade de retenção de água, densidade, porosidade, resistência do solo à penetração).....	11
4. MATERIAL E MÉTODOS	13
4.1 Caracterização da área.....	15
4.2 Biocarvão	17
4.2.1 Análise granulométrica e caracterização física do biocarvão	19
4.2.2 Análise elementar e caracterização química do biocarvão	20
4.2.3 Capacidade de troca de cátions do biocarvão	21
4.2.4 Capacidade de retenção de água do biocarvão.....	23
4.3 Instalação e condução do experimento.....	24
4.4 Avaliação de atributos químicos e físicos do solo	25
4.5 Avaliação do carbono facilmente oxidável, carbono total, estoque de carbono e de nitrogênio do solo	28
4.5 Nutrição mineral e produtividade do milho	29
4.6 Análises Estatísticas	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 Caracterização da área experimental.....	31
5.2 Caracterização do biocarvão	37
5.2.1. Capacidade de retenção de água do biocarvão.....	41

5.3 Atributos químicos e físicos do solo	42
5.4 Carbono facilmente oxidável, carbono total, estoque de carbono e de nitrogênio do solo	58
5.5 Nutrição mineral e produtividade do milho	69
6. CONCLUSÃO	75
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
8. REFERÊNCIAS	76
9. ANEXOS	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do Latossolo Vermelho Distrófico, na camada 0,00-0,20 m.....	15
Tabela 2. Caracterização granulométrica e argila dispersa do solo até profundidade de 1,00 m para caracterização inicial da área experimental.....	34
Tabela 3. Atributos de fertilidade até nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m para caracterização inicial da área experimental.....	35
Tabela 4. Teores totais de carbono (%) e nitrogênio (%) até 1,0 m para caracterização inicial da área experimental.....	36
Tabela 5. Análise química do biocarvão de eucalipto.....	40
Tabela 6. Capacidade de retenção de água do biocarvão de eucalipto, resíduo da produção de carvão vegetal carbonizado em forno de alvenaria a 350 °C, submetido à diferentes tensões matriciais.....	42
Tabela 7. Atributos médios de fertilidade do Latossolo Vermelho Distrófico para camada de 0,00-0,20 m em função das doses de biocarvão após 14 meses da aplicação.....	44
Tabela 8. Atributos de fertilidade do solo médios na camada 0,00-0,20 m em tratamentos com diferentes doses de biocarvão após 28 meses da aplicação.....	47
Tabela 9. Macroporosidade e microporosidade do solo nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m em tratamentos com diferentes doses de biocarvão após 28 meses da aplicação.....	49
Tabela 10. Porosidade total do solo nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m em tratamentos com diferentes doses de biocarvão após 28 meses da aplicação.....	50
Tabela 11. Umidade volumétrica média do solo até 0,40 m de profundidade e potências matriciais de 0,000, -0,006, -0,033 e -1,500 MPa conforme tratamento com biocarvão, após 28 meses de aplicação no solo.....	51
Tabela 12. Umidade atual do Latossolo Vermelho Distrófico nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 m conforme tratamento com biocarvão.....	54
Tabela 13. Razão isotópica $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do biocarvão, solo sem BC e solo + biocarvão na camada 0,00-0,05 m após 14 meses de aplicação.....	59
Tabela 14. Teores médios de micronutrientes encontrados na folha diagnóstica do milho conforme tratamento com biocarvão e safra agrícola (2016/17 e 2017/18).....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matéria prima, processo de pirólise, produto final, aplicações e usos dos produtos. Adaptado de SOSHI et al. (2009).....	6
Figura 2. Área experimental, localizada no Centro Experimental Central do Instituto Agrônomo, no município de Campinas, estado de São Paulo (Google Earth, 2019).....	13
Figura 3. Precipitação pluviométrica (mm), temperaturas mensais (°C) e etapas realizadas durante o experimento de abril de 2016 a agosto de 2018, no município de Campinas – São Paulo. Fonte: CIIAGRO, 2018.....	14
Figura 4. Croqui da área experimental.....	16
Figura 5. Floresta de eucalipto para produção de carvão (A); transporte e armazenamento de toras de eucalipto para processo de carbonização (B , C); fornos de alvenaria para carbonização das toras de eucalipto e biocarvão (D). Região do município de Francisco Dumont, estado de Minas Gerais.....	18
Figura 6. Bags contendo 8,1 kg de biocarvão de eucalipto, resíduo da produção de carvão vegetal carbonizado em forno de alvenaria à 350 °C.....	19
Figura 7. Subdivisão das parcelas (A); subdivisão das doses de biocarvão de eucalipto aplicadas (B); aplicação do biocarvão (C); incorporação do biocarvão ao solo (D). Campinas – São Paulo, abril de 2016.....	25
Figura 8. Mini trincheira na forma de escada com degraus nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 m.....	27
Figura 9. Amostra com estrutura do solo preservada e umidade atingida após ser submetida à Ψ_m -0,033 MPa do Latossolo Vermelho Distrófico sendo analisada quanto à resistência a penetração pelo penetrômetro de bancada marca SHIMPO modelo FGV-250 PVL.....	28
Figura 10. Densidade do solo para caracterização da área experimental até 1,00 m de profundidade.....	31
Figura 11. Porosidade total (A) e distribuição de poros (B) do solo e para caracterização da área experimental até 1,00 m de profundidade.....	33
Figura 12. Curvas de retenção de água do solo em diferentes camadas até 1,00 m de profundidade para caracterização da área experimental.....	34
Figura 13. Amostra de biocarvão de eucalipto, resíduo da produção de carvão vegetal carbonizado em forno de alvenaria à 350 °C, coletada para caracterização do biocarvão...	37
Figura 14. Diâmetro dos poros do biocarvão conforme faixa de adsorção de nitrogênio...	38

Figura 15. Microscopia eletrônica de varredura do biocarvão de eucalipto, resíduo da produção de carvão vegetal carbonizado em forno de alvenaria à 350 °C.....	39
Figura 16. Capacidade de troca de cátions do solo ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) determinada pelo método de deslocamento de Na^+ com acetado de amônio (GASKIN et al., 2008), conforme tratamento com BC, após 14 meses de aplicação.....	45
Figura 17. Água disponível para as plantas conforme profundidade e dose de biocarvão aplicada.....	53
Figura 18. Densidade do solo conforme tratamento com biocarvão 28 meses após a aplicação, até 0,40 m de profundidade.....	55
Figura 19. Resistência do solo à penetração conforme tratamento com biocarvão, nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m.....	57
Figura 20. Carbono facilmente oxidável (g dm^{-3}) do solo na camada 0,00-0,20 m após a safra 2016/17 de milho conforme tratamento com biocarvão.....	58
Figura 21. Contribuição e origem com carbono no teor total da camada 0,00-0,05 m conforme tratamento com biocarvão após 20 meses da aplicação.....	60
Figura 22. Teor de carbono facilmente oxidável (g dm^{-3}) do solo na camada 0,00-0,20 m após a safra 2017/18 de milho conforme tratamento com biocarvão.....	61
Figura 23. Carbono total (g kg^{-1}) do solo coletado na profundidade de 0,20 m após safras 2016/17 e 2017/18 conforme tratamento com biocarvão.....	62
Figura 24. Teores de carbono total do solo após safra de 2016/17 conforme profundidade e dose de biocarvão aplicada.....	63
Figura 25. Teores de carbono total do solo após safra de 2017/18 conforme profundidade e dose de biocarvão aplicada.....	64
Figura 26. Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) referente a cada camada do solo e conforme tratamento com biocarvão após 28 meses da aplicação.....	66
Figura 27. Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) na camada 0,00-0,40 m do solo conforme tratamento com biocarvão após 28 meses da aplicação.....	67
Figura 28. Teores médios de macronutrientes encontrados na folha diagnóstica do milho conforme tratamento com biocarvão e safra de milho (2016/17 e 2017/18). Nitrogênio (A); potássio (B); fósforo (C); enxofre (D); cálcio (E) e magnésio (F).....	69
Figura 29. Precipitação e excedente hídrico semanal (mm) referentes às safras 2016/17 (A), 2017/18 (B). Condições climáticas para o desenvolvimento vegetal (C).....	72
Figura 30. Produção de matéria seca (folhas e colmos) e grãos (umidade corrigida para 13%) referentes às safras 2016/17 (A), 2017/2018 (B) e acumulada nas duas safras (C) conforme tratamento com biocarvão e população de 66.000 plantas ha^{-1}	73

Biocarvão nos atributos físicos, químicos e produtividade do milho em solo sob clima tropical

RESUMO

O biocarvão (BC), frequentemente citado por aumentar a qualidade química, física e biológica do solo e a produtividade das culturas, tem a maioria das pesquisas desenvolvidas em ambientes controlados e de curta duração, assim, pouco pode se dizer sobre os seus efeitos agronômicos em campo. Além disso, os estudos se concentram em regiões temperadas e solos arenosos e degradados, sendo incertos os benefícios para solo argiloso em região de clima tropical. Com a hipótese de as alterações nos atributos químicos e físicos do solo, que resultarão em maior produtividade do milho, são acentuadas conforme o aumento na dose de BC aplicada, a presente pesquisa foi desenvolvida em solo de textura argilosa, por 28 meses, com o BC de eucalipto oriundo da produção de carvão vegetal e aplicação de adubação mineral tradicional. Foram estudados tratamentos com aplicação de uma única dose de BC e com aplicação parcelada repetida periodicamente (BCP), sendo: Controle, sem BC; 10, 20, 30, 40 e 50 Mg ha⁻¹ de BC em aplicação única e aplicação antes do plantio de 10 Mg ha⁻¹ de BC (BCP). A aplicação das doses únicas e a primeira aplicação da dose parcelada ocorreu em abril de 2016, havendo cultivo de milho em 2016/17 e 2017/18. O solo foi coletado em junho de 2017 e agosto de 2018 (14 e 28 meses após a aplicação). Os efeitos do biocarvão no solo foram avaliados com: análise anual (14 e 28 meses após a aplicação de BC) da fertilidade do solo nas camadas 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, teores totais de carbono e nitrogênio nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m e análise isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) para caracterização da MOS; após 28 meses de incorporação do BC: densidade, porosidade, capacidade de retenção de água (CRA), resistência do solo à penetração e estoque de carbono do solo. Os efeitos sobre a cultura do milho foram realizados com avaliação nutricional das folhas diagnosticas, quantidade de matéria seca na parte aérea e produtividade de grãos do milho nas duas safras agrícola. As doses de BC provocaram aumento nos valores de pH e de cálcio e da MOS no primeiro ano de coleta e nos teores de fósforo e potássio no segundo ano. Porosidade total, macro e microporosidade e CRA aumentaram linearmente com a dose de biocarvão apenas na camada 0,05-0,10 m do solo. A densidade diminuiu com o aumento da dose de BC e não houve efeito na resistência do solo à penetração devido ao acréscimo de BC. O BC não interferiu na absorção de nutrientes pelo milho nem na produtividade de grãos após 10 meses e 22 meses de aplicação. Os teores de carbono no solo aumentaram linearmente em função do aumento da dose de BC aplicada, sendo de 19 g dm⁻³ para o tratamento sem biocarvão e atingindo o valor de 35 g dm⁻³ com aplicação de 50 Mg ha⁻¹ de BC. Da mesma forma, os estoques de carbono no solo na camada 0,00-0,40 m foram 36% e 55% superiores ao Controle, com aplicação de 40 e 50 Mg ha⁻¹ de BC, respectivamente. Alterações nos valores de pH e teores de MOS, e cálcio da primeira coleta e de fósforo e potássio na segunda coleta para análise de fertilidade do solo, devido ao acréscimo de BC, não foram suficientes para alterar os teores de nutrientes das folhas diagnósticas, nem a produtividade do milho, indicando que o BC pouco interferiu na qualidade do solo e não disponibilizou os nutrientes que foram acrescidos por meio dele, sendo que a real contribuição do BC no solo foi o aumento no estoque de carbono.

Palavras Chave: matéria orgânica do solo, estoque de carbono, isótopos de carbono, capacidade de retenção de água, resistência do solo à penetração.

Biochar on physical and chemical attributes and corn yield on soil under tropical climate conditions

ABSTRACT

Biochar (BC), often cited as being able to increase the chemical, physical and biological quality of soil and crop yields, by sequestering carbon, has most of the research done in controlled environments and in short-term experiments, so, little can be said on the agronomic effects in the field. In addition, the studies are concentrated in temperate regions and sandy and degraded soils, and the benefits for clay soil in a tropical climate region are uncertain. With the hypothesis that changes in chemical and physical attributes of the soil, which will result in higher maize yield, are accentuated according to the increase in rates of BC applied, the present research was developed in clayey soil for 28 months, with eucalyptus biochar originating from the production of charcoal and application of traditional mineral fertilization. It was studied treatments with a single dose of BC and with repeated application periodically (BCP), being: Control, without BC; 10, 20, 30, 40 and 50 Mg ha⁻¹ of BC in single application and annual application of 10 Mg ha⁻¹ of BC (BCP). The application of the single doses and the first application of the split dose occurred in April 2016, with maize cultivation in 2016/17 and 2017/18. Soil was collected in June 2017 and August 2018 (14 and 28 months after application). The effects of biochar in the soil were evaluated through the specific objectives: annual analysis (14 and 28 months after BC application) of soil fertility in the layers 0.00-0.20 and 0.20-0.40 m, levels total carbon and nitrogen in the layers 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30 and 0.30-0.40 cm and isotopic analysis ($\delta^{13}\text{C}$) for SOM characterization; after 28 months of BC incorporation: density, porosity, water retention capacity (WRC), soil penetration resistance and soil carbon stock. The effects on the crop were evaluated through nutritional evaluation of the diagnostic leaves in the two agricultural crops, dry matter quantity in the aerial part and corn grain yield. The rates of BC caused an increase in pH and calcium and SOM values in the first year of collection and in phosphorus and potassium levels in the second year. For soil physical attributes, total porosity, macro and microporosity, and WRC increased linearly with BC rates only in the 0.05-0.10 m layer of soil. The density decreased with the increase of BC rates and there was no difference in soil resistance to penetration. BC did not interfere maize nutrient uptake or grain yield after 10 and 22 months of application. The carbon content of the soil increased linearly as a function of the increase of the applied BC dose, being 19 g dm⁻³ for the treatment without biochar and reaching a value of 35 g dm⁻³ with application of 50 Mg ha⁻¹ of BC. Likewise, the carbon stocks in the soil in the 0.00-0.40 m layer were 36 and 55% higher than the Control, with application of 40 and 50 Mg ha⁻¹ of BC, respectively. Alterations in pH values, SOM contents, calcium of first collection and of phosphorus and potassium in second collection for analysis of soil fertility indicated that the BC addition did not alter the nutrient contents of the diagnostic leaves nor maize productivity, and little interfered in the quality of the soil and did not provide the nutrients that were added through it, and the real contribution of BC in the soil was increase in carbon stock.

Keywords: soil organic matter, carbon stock, carbon isotopes, water retention capacity, soil penetration resistance.

1. INTRODUÇÃO

Carvão vegetal é considerado a mais importante fonte de energia renovável e uma alternativa para o uso de combustíveis fósseis, provendo 6% de energia primária global (FAO, 2016), sendo utilizado em grande escala na indústria siderúrgica, para produção de ferro gusa e ferro liga. Trata-se de fonte renovável pois é produzido a partir da carbonização parcial de madeira, em geral eucalipto e pinus, e gera um resíduo sólido conhecido como fino de carvão ou, ainda, biocarvão de madeira.

Biocarvão (BC) é um material sólido produzido a partir de um processo conhecido por pirólise, no qual uma biomassa passa por degradação termoquímica em condições anaeróbicas ou com baixa concentração de oxigênio e altas temperaturas, um material versátil com possibilidade de uso na agricultura (CHEN et al., 2008; LEHMANN e JOSEPH, 2009; SCHMIDT, 2012).

Em 2016, o Brasil produziu 5 milhões de toneladas de carvão vegetal (IBGE, 2017), gerando cerca de 800 mil toneladas de biocarvão (15 a 25%). De acordo com ZANETTI (2004), 64% do biocarvão resultante da produção de carvão vegetal é descartado no ambiente (512 mil toneladas).

Na última década, houve incremento no número de pesquisas com biocarvão em todo o mundo por se tratar de um produto sustentável capaz de auxiliar a mitigação de gases de efeito estufa (GURWICK et al. 2013; AGEgnehu et al., 2015; BRASSARD et al. 2016, AGEgnehu et al., 2017; NAIR et al. 2017) e, portanto, uma potente arma contra o aquecimento global. Com as pesquisas surgiram novas perguntas sobre uso e os reais efeitos do BC, sendo que, sua utilização na agricultura visa melhorar condições físicas e químicas do solo, harmonizando produção de energia com o aumento da fertilidade do solo e sequestro de carbono., sendo que alguns trabalhos demonstraram os efeitos benéficos do BC de eucalipto nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (LIAN et al., 2006; OUYANG et al, 2013), outros evidenciaram ausência de interferência do biocarvão nos mesmos atributos (CARVALHO, 2015; REED et al.,2017).

Atualmente, o que é certo em relação ao BC é o seu poder de remediação de solos contaminados e no aumento do estoque de carbono no solo. Os resultados em relação aos efeitos do uso agrônômico do BC são, frequentemente, obtidos em estudos desenvolvidos em ambientes controlados ou experimentos de curta duração, pouco podendo se dizer sobre os efeitos agrônômicos em campo. Além disso, os estudos se concentram em regiões temperadas e solos arenosos, sendo incertos os benefícios para solo argiloso em região de clima tropical.

Há ainda uma complexidade e diversidade de resultados, devido a fatores como: grande variedade de biomassa que pode ser utilizada para a fabricação do BC; temperatura utilizada no processo; tempo de duração do processo; ativação com água ou ácido; granulometria final do produto. Aliado a essas diferenças, ainda temos fatores climáticas e atributos dos solos que recebem o BC. Mesmo se tratando de um material orgânico altamente recalcitrante, a temperatura e umidade podem influenciar na sua decomposição, modificando a estrutura do BC e aumentando sua capacidade de troca de cátions, capacidade de retenção de água e até mesmo a disponibilidade de nutrientes. Já em relação às características do solo, a granulometria influencia muito os efeitos do BC, sendo mais acentuadas alterações em solos degradados e de textura arenosa, características da maioria dos solos empregados nos estudos com BC.

Ainda relacionado aos gases de efeito estufa (GEE) e, portanto, estoque de carbono do solo, estudos (CROSS & SOHI, 2011; CELY et al., 2014; ZHAO et al., 2014) buscam determinar seus efeitos sobre o comportamento da matéria orgânica do solo (MOS), já que o BC proporciona estabilização química e bioquímica e proteção física da matéria orgânica do solo em seus poros. Portanto, as pesquisas apontam que tanto o uso agrônomo de biocarvão quanto aquele como mitigador de efeito estufa apresenta muitas incertezas em torno de seus potenciais impactos a curto e longo prazo sobre a produtividade agrícola e a saúde ambiental (MARKS et al., 2014; SUBEDI et al., 2015). Desta forma, experimentos de campo, como o desenvolvido neste trabalho, permitem a aplicação de BC em e isso possibilitará a obtenção de dados concretos sobre os efeitos do BC tanto no solo como na produção agrícola, ao longo do tempo.

O presente estudo foi desenvolvido em condições de campo durante duas safras agrícolas (2016/17 e 2017/18) com cultivo de milho no verão e pousio no inverno. O solo sobre o qual o experimento foi realizado é um Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa e sem degradação física ou química, com histórico de produtividade satisfatório e em região de clima tropical úmido. O BC utilizado é um subproduto da fabricação de carvão vegetal, não tendo o custo adicional da queima da biomassa.

Desta forma, este experimento visa avaliar os efeitos agrônômicos do BC em um Latossolo Vermelho Distrófico e na produtividade do milho, e também sobre o estoque de carbono, decorrentes da adição de biocarvão juntamente com fertilizante NPK em condição tropical.

2. HIPÓTESES E OBJETIVOS

O projeto apresentou cinco hipóteses:

1. Mesmo que a adição de biocarvão interfira na velocidade de decomposição da MOS, os estoques e teores totais de C no solo aumentam linearmente com a dose de biocarvão aplicada;
2. A aplicação de biocarvão aumentará a porosidade e a capacidade de retenção de água do solo, diminuindo a densidade e resistência do solo à penetração;
3. A aplicação de biocarvão implicará em melhorias na fertilidade do solo, como aumento do pH e teores de nutrientes;
4. Melhorias na qualidade físico-química do solo em função da aplicação de biocarvão conduzirão a maior produtividade do milho.
5. As melhorias nas qualidades físicas e químicas do solo serão maiores na aplicação única de biocarvão se comparada com a adição de doses parceladas.

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos agronômicos e os atributos químicos e físicos do solo com a aplicação de biocarvão associada ao fertilizante formulado NPK em solo tropical, em aplicação única ou parcelada, em condições de campo.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar atributos de fertilidade do solo com e sem incorporação do BC após a primeira (2016/17) e segunda (2017/18) safras de milho;
- Determinar teores de matéria orgânica e carbono no solo com e sem incorporação do BC após a primeira (2016/17) e segunda (2017/18) safras de milho e o estoque de carbono no solo com e sem incorporação do BC após duas safras de milho (2016/17 e 2017/18)
- Determinar a porosidade, densidade, capacidade de retenção de água e resistência do solo a penetração com e sem incorporação do BC após duas safras de milho (2016/17 e 2017/18);
- Avaliar nutrição e produtividade do milho em duas safras (2016/17 e 2017/18) conforme dose de BC incorporada ao solo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

O biocarvão (BC) é um material sólido produzido a partir de um processo conhecido por pirólise, no qual uma biomassa passa por degradação termoquímica em condições anaeróbicas ou com baixa concentração de oxigênio e altas temperaturas (CHEN et al., 2008; LEHMANN e JOSEPH, 2009; SCHMIDT, 2012). O biocarvão é uma alternativa para a gestão de resíduos orgânicos, pois o material, originalmente instável e facilmente decomponível, passa a ser mais estável e recalcitrante e com menor volume e massa. Isso ocorre pois, durante o processo de pirólise, as cadeias de carbono originalmente alifáticas são condensadas em carbono aromático, resultando em resistência à decomposição química e biológica, podendo permanecer no solo por centenas de anos (LEHMANN, 2007; SCHULZ e GLASER, 2012), estocando carbono, auxiliando na mitigação do efeito estufa, podendo melhorar a infiltração de água no solo e aumentar a produtividade das culturas (LEHMANN e JOSEPH, 2009).

Outro fator ambiental importante, mas negativo, associado a produção de BC é que, durante o processo de pirólise, ocorre liberação de gases combustíveis (H_2 , CH_4 e CO), redução de umidade (WATERS et al., 2011) e produção de líquido combustível originado da condensação dos gases. Esse fator deve ser computado quando o balanço de carbono do BC for considerado, ainda que em muitos processos o próprio gás produzido sustente a queima do material em um ciclo autossustentável.

O BC tem sido estudado para diversos fins como: potencial de condicionamento do solo; imobilização de contaminantes orgânicos e inorgânicos, fornecimento dos nutrientes oriundos do próprio biocarvão ou da liberação controlada de nutrientes adicionados via fertilizantes, mitigação de mudanças climáticas globais, tanto no sequestro de carbono devido a incorporação do biocarvão no solo, quanto na mitigação das emissões de CH_4 e N_2O , reciclagem e gestão de resíduos de forma a propiciar um melhor gerenciamento da questão do lixo e de sua destinação, com reaproveitamento de nutrientes e melhoria da qualidade do solo (BIBAR, 2014; LAGHARI et al., 2016).

Além de apresentar ampla gama de utilização, o BC em si é um material versátil devido à grande variedade de biomassas que podem ser utilizadas para sua produção (esterco de galinha, podas de árvores, lodo de esgoto, torta de filtro, restos culturais, entre outros) e também as variações quanto ao processo de pirólise (temperatura, teor de oxigênio e duração do processo), originando produto final com características variáveis. A velocidade e temperatura utilizada no processo de pirólise também influenciam diretamente nas propriedades do BC como pH, teor de cinzas, área superficial, microporosidade e sólidos voláteis, sendo que estes diminuem com o aumento das temperaturas utilizadas no processo e com os demais ocorre o oposto (DOWNIE

et al., 2009; LEHMANN e JOSEPH, 2009.). SOHI et al. (2009) esquematizaram algumas das biomassas, processos de pirólise e produto final com os usos que podem ser aplicados aos mesmos (**Figura 1**).

Com a variedade de produtos e processos, para identificar o material pirolisado como biocarvão, visando sua utilização segura dentro dos resultados já demonstrados pela pesquisa científica, a International Biochar Initiative (IBI) e a European Biochar Foundation (EBC) determinaram protocolos analíticos para a sua caracterização, descritos em “Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil” (IBI, 2015) e “European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar” (EBC, 2012). O Brasil, no entanto, não possui método oficial de análise ou classificação de biocarvão, sendo utilizados métodos alternativos como a Resolução 375/2006 do CONAMA ou ainda o método oficial do MAPA para fertilizantes e corretivos (BRASIL, 2007).

Na última década, pesquisas sobre o biocarvão cresceram em todo o mundo, por se tratar de alternativa sustentável de mitigação de gases de efeito estufa (GEE) e, portanto, uma potente arma contra o aquecimento global. Segundo MANGRICH et al. (2011), o biocarvão permite harmonizar a produção de energia e de alimentos com o aumento da fertilidade do solo e o sequestro de carbono, fazendo dessa tecnologia uma das poucas disponíveis com potencial para responder questões com degradação dos solos, escassez de alimentos e fertilizantes, competição por biomassa e emissões de gases do efeito estufa. ASAI et al. (2009) complementam citando benefícios ambientais e agronômicos como a redução da lixiviação de nitrogênio, neutralização da acidez do solo, decréscimo na quantidade de alumínio extraível, redução na densidade do solo, aumento na condutividade hidráulica saturada, melhora na permeabilidade da água no solo e na disponibilidade de fósforo para as plantas.

Desta forma, a utilização de BC na agricultura visa melhorar condições físicas e químicas do solo, principalmente solos de regiões tropicais que dependem tanto de matéria orgânica para regular sua capacidade de troca de cátions (CTC). Por mais que a estrutura química do BC e a natureza particulada, aliadas à sua estrutura porosa, afetem propriedades tais como a CTC, retenção de água e nutrientes (UCHIMIYA et al., 2010), os efeitos do biocarvão no solo são controversos. Alguns trabalhos demonstraram os efeitos benéficos do BC nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (LIANG et al., 2006; STEINER et al., 2007; OUYANG et al., 2013) outros evidenciaram ausência de interferência do biocarvão nas mesmas propriedades (CARVALHO, 2015; REED et al., 2017); outros ainda relatam diminuição da capacidade de retenção de água de solo.



Figura 1. Matéria prima, processo de pirólise, produto final, aplicações e usos dos produtos. Adaptado de SOSHI et al. (2009).

Ainda relacionado aos GEE e, portanto, ao estoque de carbono do solo, estudos buscam determinar os efeitos do BC no comportamento da matéria orgânica do solo (MOS), já que o BC pode proporcionar estabilização química e bioquímica e proteção física da matéria orgânica do solo em seus poros (LEHMANN et al., 2011). No entanto, o uso agrônômico de biocarvão apresenta muitas incertezas em torno de seus potenciais impactos a curto e longo prazo sobre a produtividade agrícola e efeitos ambientais (MARKS et al., 2014; SUBEDI et al., 2015). Desta forma, experimentos de campo de longa duração que estudem a aplicação de BC em solo sem controle de temperatura ou umidade possibilitam a obtenção de dados concretos sobre os efeitos do BC tanto no solo como na produção agrícola, e as interferências do tempo de permanência do BC no solo sobre estes.

3.1. Carvão vegetal, biocarvão e seu uso agrícola

Carvão vegetal é considerado a mais importante fonte de energia renovável e uma alternativa para o uso de combustíveis fósseis, provendo 6% de energia primária global (FAO, 2016), sendo utilizado em grande escala na indústria siderúrgica, para produção de ferro gusa e ferro liga. Trata-se de fonte renovável pois é produzido a partir da carbonização parcial de madeira, em geral eucalipto e pinus, e gera como resíduo o biocarvão. O processo geralmente ocorre em fornos de alvenaria, com temperatura considerada ótima para queima entre 300 e 450 °C (PINHEIRO et al., 2005) e com baixa concentração de O₂,

Em 2016, o Brasil produziu 5 milhões de toneladas de carvão vegetal (IBGE, 2017), gerando cerca de 800 mil toneladas de biocarvão (15 a 25%). De acordo com ZANETTI (2004), 64% do BC resultante da produção de carvão vegetal é descartado no ambiente, o que resultou em cerca de 512 mil toneladas de biocarvão.

Uma das vantagens da utilização do biocarvão oriundo da fabricação de carvão vegetal é que não se tem o custo adicional da queima da biomassa, já que este BC é o subproduto final. REED et al. (2017), compararam os efeitos da aplicação de biocarvão (10 Mg ha⁻¹) e tratamento controle em um solo de textura franco argilo arenosa, na camada 0,00-0,10 m, encontrando aumento no pH do solo, maior disponibilidade de fósforo e potássio, maior teor de carbono no solo e umidade no tratamento com BC, fatores que não afetaram o crescimento do capim (matéria seca e altura da planta) ou os teores de nutrientes encontrados na planta após um ano de interação do BC com o solo. O BC utilizado pelos autores era composto por 845±5 g kg⁻¹ de carbono, 5,8±0,2 g kg⁻¹ de nitrogênio, 1,1±0,1 g kg⁻¹ de fósforo e 4,2±0,2 g kg⁻¹ de potássio e valor de pH igual a 10,42±0,02.

Em um experimento com BC de madeira em solo franco arenoso e cultivo de arroz sequeiro por 3,5 anos, CARVALHO (2015) avaliou os efeitos da adição de BC na fertilidade e atributos físicos do solo e produtividade do arroz. O biocarvão utilizado apresentava 76% de carbono, 0,8% de nitrogênio, 0,0002% de fósforo e 0,003% de potássio. As doses de BC utilizadas foram de 0, 8, 16 e 32 Mg ha⁻¹, incorporados na camada 0,00-0,15 m do solo. Também foram utilizadas diferentes doses de fertilizante nitrogenado (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹). Houve aumento na quantidade de água disponível para as plantas e na matéria orgânica do solo conforme o aumento nas doses de BC aplicadas, no entanto, esse aumento não interferiu na produtividade do arroz.

Em estudo sobre os efeitos de biocarvão de madeira nas propriedades físicas do solo, MORAGUES-SAITUA et al. (2017) avaliaram a densidade, porosidade, capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica e tamanho de agregados. Os autores utilizaram como tratamentos doses 0, 3,5 e 10 Mg ha⁻¹ de BC em solo de textura média e 0, 10 e 20 Mg ha⁻¹ de BC em solo de textura franco arenosa. Os mesmos tratamentos ainda foram subdivididos em tratamento com ou sem adição de nitrato de amônio. Após 15 meses de experimento, os autores observaram que a aplicação 10 Mg ha⁻¹ de BC enriquecido com nitrato de amônio diminuiu a capacidade de retenção de água e microporosidade do solo franco arenoso, não alterando os demais atributos deste solo ou os atributos do solo de textura média. Os autores ainda concluíram que são necessárias pesquisas de campo a longo prazo para investigar a interação solo-raiz, mudanças na comunidade microbiana e nas propriedades hidráulicas do solo devido ao acréscimo de BC.

3.2 Biocarvão e a matéria orgânica do solo

Um exemplo citado com frequência que retrata a importância da matéria orgânica do solo (MOS) é a Terra Preta de Arqueológica (TPA) encontrada na Região Amazônica. Em regiões com solos ácidos, de baixa CTC e consequente baixa fertilidade e potencial produtivo, alguns locais apresentam uma terra com coloração escura e grande aporte de material orgânico e atividade biológica mais elevada que os solos adjacentes (STEINER et al., 2004). Esse material, de origem pirogênica proporcionou ao solo um teor elevado de matéria orgânica estável, fósforo disponível, cálcio, magnésio, zinco, manganês e carbono, contribuindo para o aumento da fertilidade do solo (NOVOTNY et al., 2009; MOREIRA e MALAVOLTA, 2002; COSTA e KERN, 1999).

Essas características da TPA influenciaram pesquisas sobre a aplicação de biocarvão no solo, visando provocar as mesmas melhorias em regiões diferentes. O biocarvão, também material de origem pirogênica, apresenta carbono orgânico com maior resistência à decomposição microbiana. Essa resistência, juntamente com a capacidade de proteção físico-química da MOS em seus poros, pode ocasionar o aumento no teor de MOS que, em sua maior parte, é constituída por substâncias húmicas mais estáveis e de difícil degradação. Essas substâncias são formadas a partir da transformação dos resíduos orgânicos realizada pela biomassa microbiana presente no solo e pela polimerização dos compostos orgânicos processados até a síntese de macromoléculas resistentes à degradação biológica (CAMARGO et al., 1999).

O aporte de carbono devido ao acréscimo de BC no solo é garantido tanto pela quantidade de C presente no BC como à forma mais estável na qual se apresenta, já que o BC é rico em compostos aromático condensados e tem maior resistência à degradação que outros compostos orgânicos (BALDOCK e SMERNIK, 2002; KNICKER et al., 2013). Por este fato, o BC vem sendo utilizado para aumentar o estoque de carbono no solo e auxiliar na mitigação do efeito estufa. Contudo, a aplicação de BC pode afetar a taxa de mineração do carbono orgânico do solo oriundo de resíduos vegetais, fazendo com que muitos estudos (RITTIL et al., 2015; WENG et al., 2015; PURAKAYASTHA et al., 2016; RIAZ et al., 2017; YOUSAF et al., 2018) tenham se dedicado a avaliar a alteração da dinâmica de decomposição da MOS devido à aplicação de biocarvão.

Ao ser acrescentado no solo, o biocarvão pode fornecer carbono lábil e alguns outros nutrientes prontamente disponíveis, estimulando o crescimento da comunidade microbiana do solo (LEHMANN et al., 2011), provocando um aumento na taxa de mineralização/degradação de MOS, ocasionando um efeito *priming* positivo. Além disso, sua estrutura porosa e com elevada área superficial pode aumentar a aeração do solo e também a capacidade de retenção de água, características que também favorecem a atividade microbiana (ZIMMERMAN et al., 2011; LIANG et al., 2014; DONG et al., 2018).

Já a diminuição na taxa de mineralização da MOS, que seria o efeito *priming* negativo, pode ocorrer pelo favorecimento de formação de agregados no solo, formação de complexos organo-minerais. O BC ainda pode apresentar algum efeito tóxico à microbiota, adsorver enzimas, nutrientes e carbono na superfície do BC ou, ainda, uma seletividade de mineralização do carbono orgânico proveniente do BC ao da MOS (VERHEIJEN et al., 2009; ZIMMERMAN et al., 2011; RITTIL et al., 2015).

Os efeitos do biocarvão no solo podem não ocorrer imediatamente após a sua aplicação. JONES et al. (2012) relatam que o biocarvão, quando fresco, possui pouco potencial biológico, o que será adquirido ao longo do tempo. Isso porque a estrutura porosa do biocarvão torna-se um habitat sustentável para colonização, crescimento e reprodução, particularmente para bactérias, actinomicetos e fungos micorrízicos arbusculares, servindo de abrigo aos microrganismos contra predadores da fauna do solo (PIETIKÄINEN et al., 2000), adsorvendo matéria orgânica solúvel, gases e nutrientes que sustentarão a comunidade microbiana (THIES e RILLIG, 2009).

3.3 Biocarvão e fertilidade solo

Solos de regiões de clima tropical, como os solos brasileiros, a matéria orgânica pode contribuir com até 80% da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo. Assim, uma variação na quantidade e qualidade da matéria orgânica pode causar grande efeito sobre as propriedades e processos que ocorrem no sistema solo, devido ao fato de os teores de matéria orgânica regular a CTC. Pesquisas apontam para a contribuição do biocarvão na fertilidade solo, melhorando atributos químicos, físicos e biológicos (SCHMIDT e SKJEMSTAD, 2002; LEHMANN et al., 2003; LIANG et al., 2006; STEINER et al., 2007; OUYANG et al., 2013; AGEgnehu et al., 2015; AGEgnehu et al., 2017).

Em um estudo sobre atributos químicos do solo comparando valores encontrados na Terra Preta do Índio (TPI) e com os de solos adjacentes (SA), MORALES (2010) encontrou teores médios de carbono orgânico (C_{org}) iguais a 38,9 (TPI) e 16,4 g kg⁻¹ (SA), fósforo (P) iguais a 507 (TPI) e 1,7 mg kg⁻¹ (SA), cálcio + magnésio iguais a 94 (TPI) e 14 mmol_c kg⁻¹ (SA), pH iguais a 5,6 (TPI) e 4,5 (SA), CTC iguais a 174 (TPI) e 82 mmol_c kg⁻¹ (SA). Essas melhorias químicas proporcionam aumento na qualidade do solo e na produtividade das culturas.

CARVALHO (2015) avaliando os efeitos de BC de madeira na fertilidade de um solo argiloso em experimento de campo observou o aumento no pH e CTC do solo, teores de cálcio e magnésio e decréscimo no teor de alumínio conforme o aumento na dose de BC. Os tratamentos utilizados no experimento combinaram doses de BC (0, 8, 16 e 32 Mg ha⁻¹) incorporado na camada 0,00-0,15 m com doses de N mineral (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹) e cultivo de arroz sequeiro. No entanto, os efeitos do BC no solo não acarretaram em maior produtividade de grãos.

Em experimento de campo com aplicação de BC de eucalipto (0, 8, 16 e 32 Mg ha⁻¹), PETTER et al. (2012) observaram aumento no pH, disponibilidade de cálcio e fósforo e no teor

de carbono orgânico total de um Plintossolo Háplico textura franco-arenosa, aumentando a produtividade do arroz sequeiro.

Em experimento em vasos conduzido em casa de vegetação, VAN ZWIETEN et al. (2010) observaram aumento no pH, CTC e teores de cálcio, potássio e carbono total de um Latossolo após a aplicação de 10 Mg ha⁻¹ de BC de resíduos da indústria de papel e celulose. Os autores atribuíram ao BC um poder de neutralização em torno de 30% em comparação com CaCO₃. Quando combinada a aplicação de BC com N mineral, as alterações no Latossolo proporcionaram aumento na absorção de N pela cultura do trigo e aumento na produtividade do trigo, soja e rabanete. Sem a adição de N, o BC apenas aumentou a produção de biomassa do rabanete, não interferindo nas demais culturas. Desta forma, os autores concluíram que a resposta das plantas ao acréscimo de BC no solo depende das características do BC, tipo de solo e espécie cultivada.

O tempo de permanência do BC no solo é incerto e, mesmo que sofra biodegradação e transformação no solo, é considerado estável quando comparado a outras formas de MO (MADARI et al., 2006). Os benefícios do BC no solo, também incertos, tendem a aumentar com o tempo de permanência, sendo a retenção de cátions de biocarvão do BC uma delas, não sendo claro em que condições e em que período de tempo o biocarvão desenvolve suas propriedades adsorventes (LEHMANN, 2007). Essas características permitem que o BC, mesmo sem fornecimento direto de nutrientes, seja capaz de interagir com fertilizantes minerais, aumentando a eficiência de assimilação pelas plantas e, conseqüentemente, a produtividade das culturas (ALBUQUERQUE et al., 2013).

3.4 Biocarvão e atributos físicos do solo (capacidade de retenção de água, densidade, porosidade, resistência do solo à penetração)

Assim como os atributos químicos, os físicos também interferem na qualidade do solo e, conseqüentemente, na produtividade das culturas, dando destaque para a porosidade, densidade, capacidade de retenção de água (CRA) e resistência do solo à penetração (RP), que são alguns dos atributos físicos do solo que podem ser alteradas com a incorporação de BC, isso porque, com o aporte de C, a aplicação de biocarvão no solo pode provocar melhorias na estruturação (FUNGO et al., 2017).

Segundo SIX et al. (2004) como o BC possui grande área superficial e alta porosidade se comparado a outros tipos de matéria orgânica do solo, seu acréscimo pode aumentar a agregação do solo e melhorar a estrutura do solo ao interagir com a MOS, minerais e

microrganismos. Somada à presença de microporos, o BC pode contribuir com capacidade de adsorção do solo e alterar a área superficial do conjunto, o tamanho de poros, densidade, capacidade de retenção de água e resistência do solo à penetração (MUKHERJEE e LAL, 2013). Segundo os autores, alterações significativas nas propriedades físicas do solo podem ocorrer com o acréscimo de 1 – 2% (g g^{-1}) de BC.

A densidade do solo garante a sustentação de cultura e está relacionada a sua porosidade que, por sua vez, interfere na aeração, condução e retenção da água, resistência do solo à penetração e à ramificação das raízes e, consequentemente, no aproveitamento de águas e nutrientes pelas plantas.

Essas possíveis alterações fazem com que o BC seja visto como um condicionador de solo que, segundo BERNARDI et al. (2009) é uma alternativa interessante para a melhoria do sistema agrícola como um todo, pois envolve a aplicação de materiais aos solos que modificam favoravelmente as propriedades físicas, tais como a capacidade de retenção de água. No entanto, o impacto do biocarvão sobre a capacidade de retenção de água do solo, pode variar devido à composição heterogênea e sua superfície, podendo apresentar propriedades hidrofílicas, hidrofóbicas, ácidas ou básicas, provocando reações diferentes quando adicionado ao solo (AMONETTE e JOSEPH, 2009; ATKINSON et al., 2010).

Em relação à capacidade de retenção de água, alguns estudos mostraram que a adição de biocarvão no solo aumentou a CRA devido à alta porosidade do material. Esse efeito ocorreu principalmente em solos arenosos (PETTER et al., 2012; THIES e RILLING, 2009, ZHANG et al., 2010, LAIRD et al., 2010), sendo que em experimento de vaso e solo de textura arenosa, NOVAK et al. (2012), utilizando BC de 5 diferentes biomassas e duas temperaturas de pirólise, observaram aumento na retenção de água de cerca de 10% em relação aos controles, com adição de 2% de BC de gramínea, pirolisado a 500 °C. Efeito oposto foi encontrado em experimento de campo por CARVALHO (2015) com produção de arroz em solo argiloso, indicando que houve mudanças na porosidade e estrutura do solo após 2,5 anos da aplicação do biocarvão, levando a uma diminuição na CRA do solo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico, na cidade de Campinas, São Paulo, localizado a 22°9' Latitude Sul e 47°1' Longitude Oeste, com altitude de aproximadamente 640 m (**Figura 2**).



Figura 2. Área experimental, localizada no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico, no município de Campinas, estado de São Paulo (Google Earth, 2019).

O clima na região foi classificado como tropical úmido (Cwa) (ALVARES et al., 2013) com verão quente e úmido e inverno seco (classificação de Köppen). A temperatura média anual é de 23 °C com precipitação média anual de 1060 mm. O experimento foi conduzido por dois anos agrícolas (2016/17 e 2017/18). Nos dois anos agrícolas foi implantada a cultura de milho no verão visando produção de grãos. Durante a condução do experimento, foram monitoradas a temperatura e precipitação pluviométrica, como apresentado na **Figura 3**.

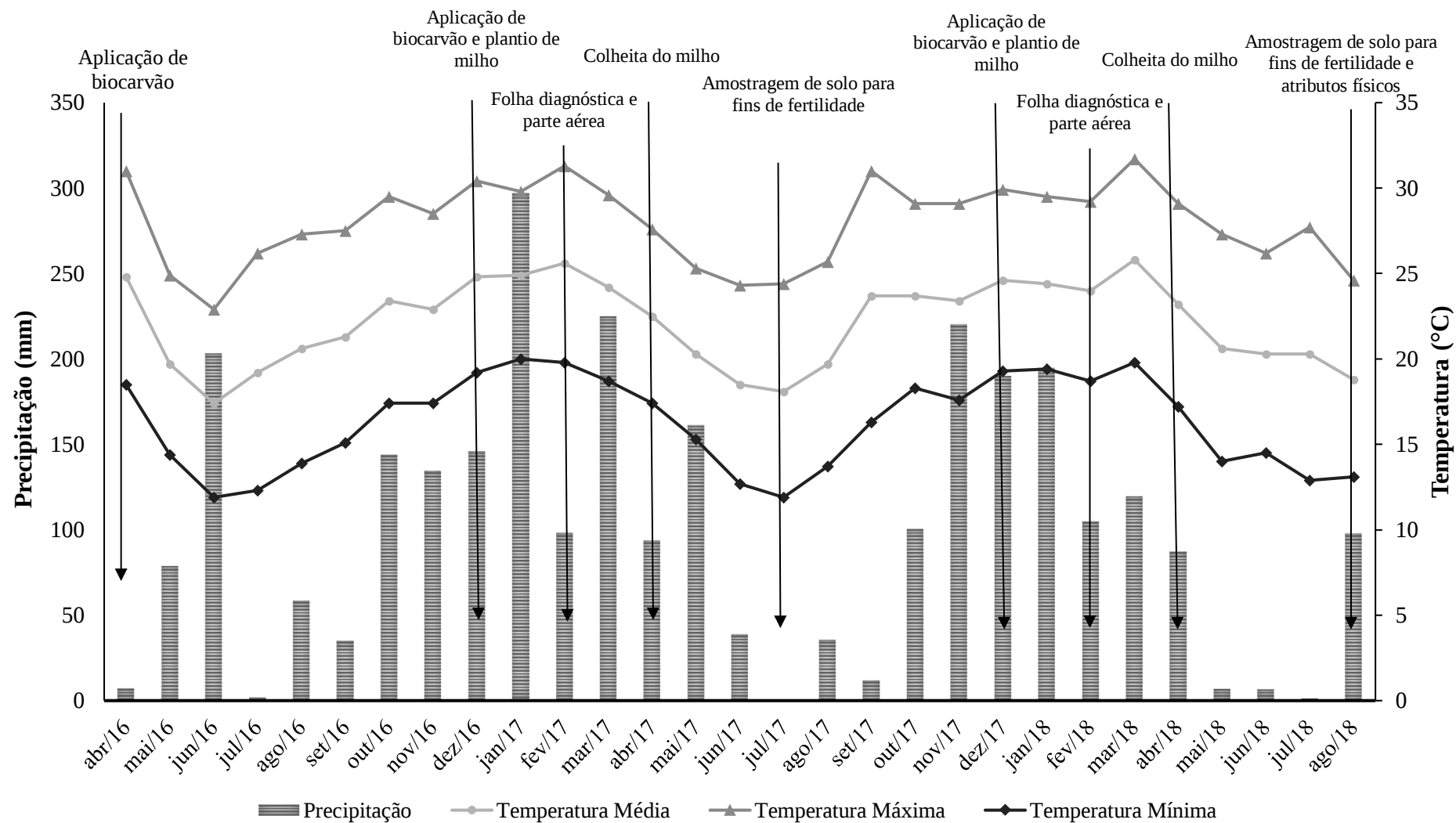


Figura 3. Precipitação pluviométrica (mm), temperaturas mensais (°C) e etapas realizadas durante o experimento de abril de 2016 a agosto de 2018, no município de Campinas – São Paulo. Fonte: CIIAGRO, 2018.

4.1 Caracterização da área

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, textura argilosa conforme SANTOS et al. (2018) e foram determinados atributos de fertilidade e físicos da camada 0,00-0,20 m conforme metodologia descrita por RAIJ et al. (2001) e CAMARGO et al. (2009), apresentadas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do Latossolo Vermelho Distrófico, na camada 0,00-0,20 m.

pH	MOS ⁽¹⁾	P ⁽²⁾	Ca ⁽³⁾	Mg ⁽⁴⁾	K ⁽⁵⁾	SB ⁽⁶⁾	H+Al ⁽⁷⁾	CTC ⁽⁸⁾	V ⁽⁹⁾
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----						%
5,4	20	11	18	5	2	25	28	53	47
Argila	Silte	Areia Grossa		Areia Fina		Classificação Textural ⁽¹⁰⁾			
----- g kg ⁻¹ -----									
518	85	278		119		Argiloso			

⁽¹⁾MOS: matéria orgânica do solo; ⁽²⁾P: fósforo; ⁽³⁾Ca: cálcio; ⁽⁴⁾Mg: magnésio; ⁽⁵⁾K: potássio; ⁽⁶⁾SB: soma de bases; ⁽⁷⁾H+Al: acidez potencial; ⁽⁸⁾CTC: capacidade de troca de cátions; ⁽⁹⁾V: saturação por bases; ⁽¹⁰⁾Classificação de acordo com o Departamento de Agricultura dos EUA (USDA). 2 mm > Areia grossa > 0,5 mm > Areia fina > 0,05 > Silte > 0,002 mm > Argila.

O experimento foi composto por 4 blocos e 7 tratamentos em delineamento estatístico de blocos casualizados (DBC) com 4 repetições sendo cada parcela composta por 6 linhas de plantio de milho com espaçamento de 0,90 m entre as linhas e com 6 metros de comprimento, totalizando uma área de 27 m² (4,5 m X 6 m) por parcela. Foram utilizadas 28 parcelas em área experimental total de 1280 m² (**Figura 4**).

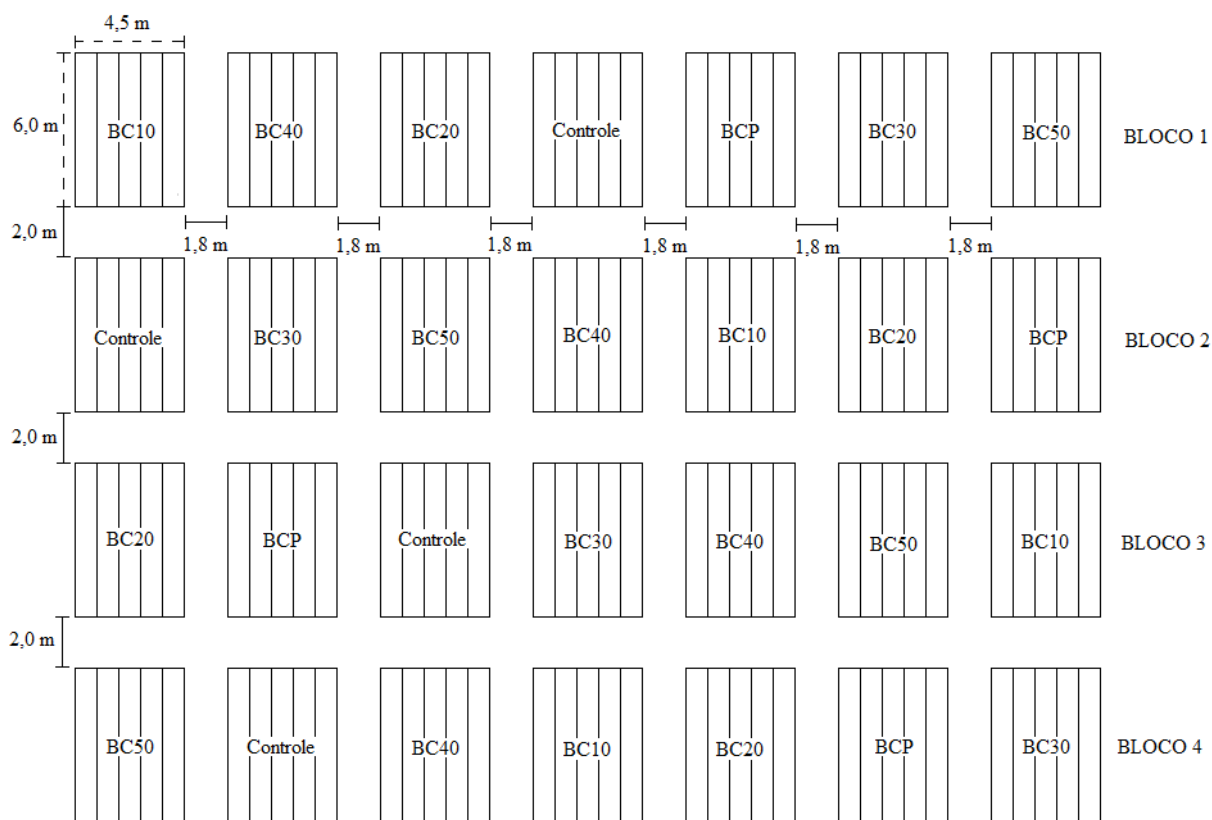


Figura 4. Croqui da área experimental. Controle: tratamento sem BC; BC10: 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20: 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30: 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40: 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50: 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP: aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC.

Em fevereiro de 2016, antes da instalação das parcelas do experimento, foram coletadas amostras para caracterização dos atributos químicos e físicos do solo em cada bloco. Para os atributos físicos do solo, foram coletadas ao longo de cada bloco 10 amostras simples para composição de uma amostra composta, nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 e 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m para determinação do teor total de areia, argila e silte. Também foi determinada argila dispersa em água pelo método da pipeta (CAMARGO et al., 2009 – Boletim 106).

Para determinação da densidade, porosidade e a curva de retenção de água, foram abertas quatro trincheiras com profundidade de 1,5 metros ao lado de cada um dos quatro blocos para coleta de amostras com estrutura preservada. As amostras foram submetidas aos potenciais matriciais (Ψ_m) de 0,00 (saturação), -0,01 MPa usando mesa de tensão e -0,033 MPa, -0,100 MPa e -1,500 MPa usando câmaras de Richards (TEIXEIRA et al., 2017). Nos blocos 1, 3 e 4 as amostras foram coletadas nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 e 0,40-0,60 m. As coletas do bloco 2 foram realizadas na parede vizinha à trincheira do bloco 3 (próxima à faixa central do experimento) e seguiram o mesmo padrão de coleta,

aprofundando em 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m. As coletas nessas duas profundidades ocorreram apenas na trincheira do bloco 2 considerando que as alterações devido a tráfego, manejo do solo e raízes das culturas não são significativas e que representariam a área experimental como um todo nestas profundidades. As curvas de retenção de água foram determinadas por meio do software Soil Water Retention Curve (SWRC) versão 3.00 (DOURADO NETO et al., 2001).

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, por 48 horas, para determinação da densidade do solo (Ds). A porosidade foi determinada utilizando a massa de água contida nas amostras saturadas (AMARO FILHO et al., 2008). A distribuição de poros do solo seguiu a classificação proposta por KLEIN e LIBARDI (2002), onde os macroporos possuem diâmetro superior a 0,05 mm, perdendo água a potenciais matriciais menores a $-0,006$ MPa e os microporos apresentam diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm, sendo esvaziados em Ψ_m entre $-0,006$ e $-1,500$ MPa.

Para análise de fertilidade solo, foram coletadas em zig-zag ao longo de cada bloco 10 amostras simples deformadas para composição de uma amostra composta nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m. Os teores totais de carbono e nitrogênio foram determinados nas camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,20-0,40 m. As amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de malha de 2 mm, sendo analisadas para fins de fertilidade, conforme os métodos descritos por RAU et al. (2001). Para teores totais de carbono e nitrogênio, alíquotas de aproximadamente 5 g foram maceradas até passarem por completo em peneira de 100 mesh (0,154 mm), com determinação de carbono e nitrogênio utilizando analisador elementar CN LECO.

O estoque de carbono original do solo (Mg ha^{-1}) em cada camada foi obtido pela multiplicação dos teores de carbono (%) pela densidade (kg dm^{-3}) e espessura (cm) da camada em questão (BAYER et al., 2000).

4.2 Biocarvão

O biocarvão utilizado no experimento é resíduo do processo de fabricação de carvão vegetal, processo realizado na região de Francisco Dumont, Minas Gerais e tendo como biomassa exclusivamente o eucalipto, espécies *E. urophilla* e *E. saligna* (**Figura 5A**). O eucalipto foi cortado em toras (**Figura 5B, 5C**) e colocado para a carbonização em fornos de alvenaria de 18 m³ (**Figura 5D**), com capacidade de produção de 1,8 Mg de carvão em cada processo. A temperatura utilizada é em torno de 350 °C e com baixa concentração de oxigênio.

O tempo utilizado no processo entre queima da madeira, resfriamento do forno e retirada do carvão, varia de 5 a 6 dias.



Figura 5. Floresta de eucalipto para produção de carvão (A); transporte e armazenamento de toras de eucalipto para processo de carbonização (B, C); fornos de alvenaria para carbonização das toras de eucalipto e biocarvão (D). Região do município de Francisco Dumont, estado de Minas Gerais.

Para aplicação mais uniforme, as 2,6 Mg de biocarvão utilizadas no experimento foram separados em bags contendo 8,1 kg (**Figura 6**), amostrando o biocarvão para caracterização. Para o teste de inibição de germinação do biocarvão foi utilizado material desta amostragem, sendo que, em potes de plástico foram plantadas 10 sementes de sorgo em solo, solo + BC ou somente BC avaliando a germinação das sementes. Os tratamentos ocorreram em triplicata.



Figura 6. Bags contendo 8,1 kg de biocarvão de eucalipto, resíduo da produção de carvão vegetal carbonizado em forno de alvenaria à 350 °C.

4.2.1 Análise granulométrica e caracterização física do biocarvão

Para análise granulométrica, foram pesados 100 g de biocarvão e passados pelas peneiras de 10, 20 e 50 mesh, em triplicata (Instrução Normativa SDA nº 35, BRASIL, 2006).

Para determinação da área superficial e distribuição de micro e mesoporos (método BET - N₂), uma amostra de biocarvão foi encaminhada para a Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas (IQ-Unicamp), Campinas/SP. A área superficial específica é definida como a superfície interna presente no material por unidade de massa, m² g⁻¹. Esta análise permite o conhecimento estrutural do material, os valores médios do tamanho do poro e sua possível distribuição no material. As técnicas de adsorção de gases utilizadas para determinação dessas estruturas, consistem na determinação da quantidade de adsorbato, necessária para formar uma camada monomolecular (monocamada) sobre a superfície a ser medida. Utiliza-se, em geral, isotermas desenvolvidas por BET (Brunauer, Emmett & Teller, 1938). A partir da equação desta isoterma, o número necessário de moléculas para formar uma monocamada pode ser avaliado, como a área ocupada pela molécula é conhecida (ou estimada) pode-se então calcular a área específica do material. Este método também permite uma avaliação da porosidade do material, sendo que materiais microporosos

(poros menores que 2 nm) adsorvem volumes altos de adsorbato em baixas pressões relativas enquanto a alta adsorção em pressões relativas altas indica presença de mesoporos (poros entre 2 e 50 nm).

Para verificar as diferenças morfológicas decorrentes da transformação da biomassa em biocarvão, foi realizada a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas (IQ-Unicamp), Campinas/SP. O equipamento utilizado foi Microscópio eletrônico de varredura com detector de energia dispersiva de raios X, modelo Leo 440i, com EDS: 6070, marca MEV e EDS: LEO Electron Microscopy Oxford, fabricado em Cambridge, Inglaterra. Para o recobrimento da amostra utilizou-se o equipamento Sputter Coater EMITECH, modelo K450, fabricado em Kent, Reino Unido. A espessura da camada de ouro utilizada foi estimada em 200 Å.

Para as micrografias utilizou-se aproximação de 500, 100, 10 e 5 µm em todos os biocarvões. Para os espectros de raio X (EDS) utilizou-se tensão de aceleração igual a 20 kV e corrente de feixe igual a 600 pA. Ressalta-se que, pela abundância dos elementos carbono e oxigênio estes não são quantificados adequadamente pelo detector EDS.

4.2.2 Análise elementar e caracterização química do biocarvão

Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) elementar do biocarvão foram determinados por combustão a seco em analisador elementar CHN (Perkin Elmer 2400), em duplicata, na Central Analítica do Instituto de Química da Unicamp, encapsulando $5,0 \pm 0,9$ mg de biocarvão em capsulas de alumínio com massa determinada. As amostras encapsuladas foram inseridas em analisador elementar Perkin Elmer CNH 2400, onde passaram pelo processo de combustão a 925 °C na presença de O₂, fazendo com que o C da amostra se transforme em CO₂, o H em H₂ e o N em gás N₂. O equipamento tem a capacidade de realizar a separação dos gases coletados por coluna cromatográfica onde é feita a detecção das porcentagens de cada elemento da amostra.

O teor de cinzas do BC foi determinado, em triplicata, pesando 0,5 g de amostra de BC em cadinhos de porcelana e aquecidos na mufla a 800 °C por seis horas e, após esse período, alocadas em dessecados por uma hora para resfriamento da amostra e, então, pesagem (ASTM D1762-84 (ASTM, 2007)). O teor de oxigênio (O) foi obtido pela diferença entre 100 e a soma dos teores de C, H, N e cinzas (KIM et al., 2012).

O biocarvão foi caracterizado de acordo com a Resolução 375/2006 do CONAMA (CONAMA, 2006) sobre uso agrícola de lodos de esgoto, determinando os seguintes

parâmetros: umidade a 65 °C, sólidos totais e sólidos voláteis determinados por perda de massa a 500 °C, nitrogênio total pelo método de Kjeldahl, nitrogênio inorgânico na forma amoniacal e nítrica pelo método de destilação por arraste a vapor, carbono orgânico por digestão com dicromato em bloco digestor e determinação por titulometria, como descrito por RAIJ et al. (2001). Os teores totais de arsênio (As), alumínio (Al), boro (B), bário (Ba), cálcio (Ca), cádmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), fósforo (P), chumbo (Pb), ferro (Fe), enxofre (S), manganês (Mn), magnésio (Mg), prata (Hg), níquel (Ni), selênio (Se), zinco (Zn), sódio (Na), potássio (K) e molibdênio (Mo) foram extraídos de acordo com a metodologia sugerida pela USEPA, SW-846 método 3051a e a determinação feita por espectrômetro de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), marca Varian, modelo Vista MPX. Para Na e K, a determinação foi realizada por fotometria de chama e, para o pH das amostras, utilizou-se extrato aquoso (1:10). A análise ocorreu em duplicata no Laboratório de Fertilizantes e Resíduos do Instituto Agrônomo, Campinas/SP.

Para determinação da concentração de nutrientes hidrossolúveis, 2,5 g de biocarvão e 150 ml de água destilada foram colocados em Frasco Erlenmeyer de 250 ml e agitados em agitador e Wagner durante 15 minutos a 30-40 rpm. Após agitação, transferiu-se o conteúdo para um balão volumétrico de 250 ml, avolumando com água destilada e deixando em repouso por 15 minutos, filtrando com filtro quantitativo de filtração lenta e determinação feita por espectrômetro de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), marca Varian, modelo Vista MPX. Para K, a determinação foi realizada por fotometria de chama. A análise foi realizada em triplicata.

4.2.3 Capacidade de troca de cátions do biocarvão

A capacidade de troca de cátions (CTC) do biocarvão foi determinada pelo método oficial do MAPA para fertilizantes e corretivos (BRASIL, 2007) e também pelo método modificado de deslocamento por acetato de amônio, conforme GASKIN et al. (2008). A principal diferença entre os métodos de análise é o processo de deslocamento do Ca^{2+} . No método oficial do MAPA, após a saturação dos sítios de troca com Ca^{2+} , o deslocamento ocorre por meio de lavagem da amostra com água deionizada enquanto que, no segundo método, após a saturação da amostra com íons Na^+ , o deslocamento dos íons adsorvidos nos sítios de troca é forçado com o uso de acetato de amônio na lavagem. O método do MAPA ainda utiliza a titulação para determinação indireta da CTC e o método de deslocamento por acetato de amônio determina diretamente a CTC com o teor de Na^+ no lixiviado por meio de leitura com fotometria de chama.

Apesar de não haver uma metodologia de análise de CTC para biocavão sugerida nem pelo IBI (2015) ou mesmo pelo EBC (2012), o método apresentado por GASKIN et al. (2008) tem sido mais utilizado e é mais aceito.

4.2.3.1 Método Oficial do MAPA para cálculo de CTC

O método analítico oficial do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para determinação de CTC de fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos (BRASIL, 2007), consiste em pesar 2,000 g do material (no caso, biocarvão) seco e moído e 1,000 g de carvão ativado, transferi-los para erlenmeyer de 250 ml, acrescentando 100 ml de HCl 0,5 mol L⁻¹, agitando por 30 minutos em agitador de Wagner a 30-40 rpm.

Após agitação, a amostra é filtrada à vácuo utilizando-se papel filtro quantitativo de filtração lenta. O material retido no filtro é lavado com água deionizada com adição de pequenas porções, recebendo nova porção após todo o líquido da anterior ter sido drenado, devendo obter um volume de 350 a 400 ml no final das lavagens.

Para a determinação, 100 ml de solução de acetado de cálcio 0,5 mol L⁻¹ é transferido para um bquer de 250 ml e adicionado ao material retido no funil, sob vácuo reduzido, em cinco frações de 20 ml cada. Após a filtração total, lava-se ainda o material com água destilada, totalizando aproximadamente um volume de 300 ml. Essa solução é titulada com NaOH 0,1 mol L⁻¹ padronizada, com o uso de cinco gotas de fenolftaleína como indicador. Uma prova em branco, utilizando-se apenas carvão ativado, é realizada para controle. O cálculo da CTC é obtido pela equação:

$$CTC \text{ (mmolc/kg)} = \frac{1000 \times M \times (V_a - V_b)}{G}$$

Onde:

V_a = volume (ml) de NaOH 0,1 mol L⁻¹ utilizado para titulação da amostra;

V_b = volume médio (ml) de NaOH 0,1 mol L⁻¹ utilizado para titulação das provas em branco;

G = massa (g) da amostra;

M = concentração molar da solução de NaOH padronizada.

4.2.3.2 Método de deslocamento por acetato de amônio para determinação da CTC

As amostras foram preparadas antes de serem analisadas para diminuição de interferência de sais solúveis, sendo lavadas e lixiviadas por 5 vezes com 10 ml de água deionizada e auxílio de papel filtro quantitativo de filtragem lenta. Após a lavagem, o material foi seco em estufa com temperatura de 65 °C por 24 horas.

O método modificado de deslocamento de acetato de amônio (GASKIN et al., 2008) consiste em pesar amostras de 1 g de biocarvão, em triplicata, acomodados em tubos de centrífuga tipo Falcon de 50 ml. As amostras, acrescidas de 20 ml de água deionizada, são agitadas por 5 minutos a 180 rpm em agitador tipo orbital. Após agitação as amostras são filtradas a vácuo com membrana de celulose 0,45 µm. Acrescenta-se 10 ml de solução de acetato de sódio 1 mol L⁻¹ (pH 7) e agita-se por 10 minutos em rotação de 180 rpm. Essa etapa é repetida três vezes para garantir a saturação da amostra com íons Na⁺. As amostras de BC são ainda lavadas com 10 ml de etanol mais três vezes, removendo o excesso de Na⁺. O Na⁺ que permaneceu nos sítios de troca do BC será deslocado acrescentando 10 ml de acetato de amônio (pH 7), processo repetido por três vezes, e a capacidade de troca de cátions do biocarvão é calculada pelo Na⁺ deslocado pelo NH₄⁺. Os lixiviados são colocados em balão volumétrico de 50 ml, completando o volume com água deionizada, utilizando fotometria de chama para a determinação do teor de Na⁺ no lixiviado.

4.2.4 Capacidade de retenção de água do biocarvão

Para a determinação da capacidade de retenção de água (CRA) do biocarvão, utilizou-se o método oficial do MAPA para substratos e condicionadores de solo (BRASIL, 2007), com adaptações devido à baixa densidade do biocarvão, as análises foram realizadas em triplicata.

O biocarvão foi colocado em anéis com 0,06 m de diâmetro e 0,04 m de altura vedados com tecido fixado por elásticos de borracha. Os cilindros foram preenchidos com BC e inseridos em bandejas com água. Os anéis foram retirados após 72 horas e colocados na mesa de tensão hidráulica com ajuste de tensão para -0,001 MPa, permanecendo até atingirem equilíbrio. Além da tensão padrão de -0,001 MPa, as amostras foram ainda submetidas à pressão de 0 (saturação), -0,0005, -0,002, -0,006, 0,033, -0,100 e -1,500 MPa. Posteriormente, as amostras foram pesadas e colocadas em estufa a 65 °C até atingirem massa constante.

O valor da CRA é obtido seguindo a Instrução Normativa nº 31 de 23 de outubro de 2008 (MAPA, 2008), conforme equação:

$$\text{CRA (v/v)} = \frac{[(m1 - m2) \times 100]}{V}$$

Onde:

m1 = massa (g) da amostra após ser retirada de cada tensão à qual foi submetida;

m2 = massa (g) da amostra após ser retirada da estufa (65 °C);

V = volume (cm³) do anel utilizado na determinação.

4.3 Instalação e condução do experimento

O experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho Distrófico (V% < 50%), sendo que no dia 27 de novembro de 2015 todos os tratamentos, incluindo o Controle, receberam calcário dolomítico para elevação do V% à 60%, na dose de 1 Mg ha⁻¹.

O biocarvão foi incorporado na camada 0,00-0,20 m do solo com auxílio de arado de disco. A aplicação do BC ocorreu em abril de 2016 respeitando os seguintes tratamentos: Controle (sem BC); BC10 (10 Mg ha⁻¹ de BC), BC20 (20 Mg ha⁻¹ de BC), BC30 (30 Mg ha⁻¹ de BC), BC40 (40 Mg ha⁻¹ de BC) , BC50 (50 Mg ha⁻¹ de BC) em aplicação única de BC; e BCP, com aplicação no preparo de solo para o plantio de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 20 Mg ha⁻¹ de BC aplicados na primeira safra (2016/17) e 30 Mg ha⁻¹ na segunda safra (2017/18). Segundo o IBI (2015), a perda de BC durante a aplicação pode chegar a 15%. Para minimizar essa perda e para que aplicação do BC ocorresse de forma uniforme, cada parcela foi subdividida em 4 partes (**Figura 7A** e **7B**). Como se trata de um material leve, a aplicação foi realizada próxima à superfície do solo (**Figura 7C**) com incorporação imediata (**Figura 7D**). Todas as parcelas, mesmo as que não receberam biocarvão (tratamento controle), foram revolvidas com o arado de disco para evitar que diferenças no manejo de solo influenciassem nos resultados.

O plantio do milho ocorreu em dezembro de 2016 e de 2017, sendo utilizada a cultivar de milho AG8676PR02, com densidade populacional de 66.000 plantas ha⁻¹. A adubação de base do milho para grãos foi realizada de acordo com o RAU et al. (1996) visando produção de 6 a 8 Mg ha⁻¹, nos dois anos agrícolas, com aplicação de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 50 kg ha⁻¹ de K₂O, aplicada em linha na formulação NPK (4-20-20), abaixo das sementes e 100 kg ha⁻¹ de

nitrogênio, na forma de sulfato de amônio, parcelado em 4 aplicações. O controle de plantas indesejáveis em pós-emergência foi realizado utilizando glifosato (5 litros ha⁻¹).



Figura 7. Subdivisão das parcelas (A); subdivisão das doses de biocarvão de eucalipto aplicadas (B); aplicação do biocarvão (C); incorporação do biocarvão ao solo (D). Campinas – São Paulo, abril de 2016.

4.4 Avaliação de atributos químicos e físicos do solo

Os efeitos do biocarvão no solo foram avaliados por meio de coleta anual de amostras no final de cada ciclo produtivo da cultura, determinando a fertilidade do solo e os teores totais de carbono e nitrogênio. As coletas de amostras de solo ocorreram em julho de 2017 (14 meses após a aplicação de BC) e agosto de 2018 (28 meses após a aplicação de BC). Juntamente com a segunda coleta para análises de fertilidade do solo, ocorreram coletas de amostras com estrutura do solo preservada para análises físicas.

O acompanhamento dos efeitos do BC na fertilidade do solo foi realizado coletando em zig-zag com auxílio de trado holandês amostras deformadas do solo na área de estudo, nas

profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, coletadas na área útil da parcela experimental uma amostra composta oriunda de cinco amostras simples. Após a coleta, as amostras compostas de solo foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2 mm de malha e analisadas, conforme os métodos descritos por RAU et al. (2001).

Além da CTC obtida pela análise de fertilidade que é calculada pela $SB + H+Al$, utilizou-se o método de deslocamento de acetato de amônio (GASKIN et al., 2008) utilizado para a determinação da CTC do biocarvão para obter CTC do solo nos tratamentos Controle, BC10, BC30 e BC50 em amostras coletas em julho de 2017.

Para a determinação dos atributos físicos do solo (capacidade de retenção de água ao $\Psi_m -1,500$ MPa), foi coletada em zig-zag cinco amostras simples deformadas de cada parcela, formando amostras compostas. As coletas nas camadas 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m foram realizadas com auxílio de enxadão e as amostras das camadas 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 foram realizadas com auxílio de trato holandês. Em todas as camadas foram coletadas amostras com preservação da estrutura do solo para a determinação da densidade, porosidade, capacidade de retenção de água e resistência do solo à penetração. A coleta das amostras com preservação da estrutura ocorreu no centro de cada parcela, com abertura de mini trincheiras na forma de escadas (**Figura 8**) com degraus referentes a cada profundidade e respeitando o fluxo vertical de infiltração da água. A determinação da capacidade de retenção de água (CRA) do solo e solo + BC nos pontos matriciais de 0,000 (saturação), -0,006 e -0,033 MPa, foram realizadas com amostras indeformadas de solo que foram preparadas e saturadas por capilaridade em bandeja com altura de lâmina de água correspondente a dois terços do cilindro, por 48 horas e, a seguir, submetidas ao $\Psi_m -0,006$ MPa em mesa de sucção (DANE e HOPMANS, 2002) e ao $\Psi_m -0,033$ MPa usando câmaras de Richards (TEIXEIRA et al., 2017). Para determinação do ponto de murcha permanente (-1,500 MPa), as amostras deformadas do solo foram submetidas à câmara de Richards até atingirem equilíbrio hidráulico. Para a determinação de macro e microporosidade, foi utilizada a classificação proposta por KLEIN e LIBARDI (2002), onde os macroporos possuem diâmetro superior a 0,05 mm, perdendo água a potenciais matriciais menores a -0,006 MPa e os microporos apresentam diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm, sendo esvaziados em Ψ_m entre -0,006 e -1,500 MPa.

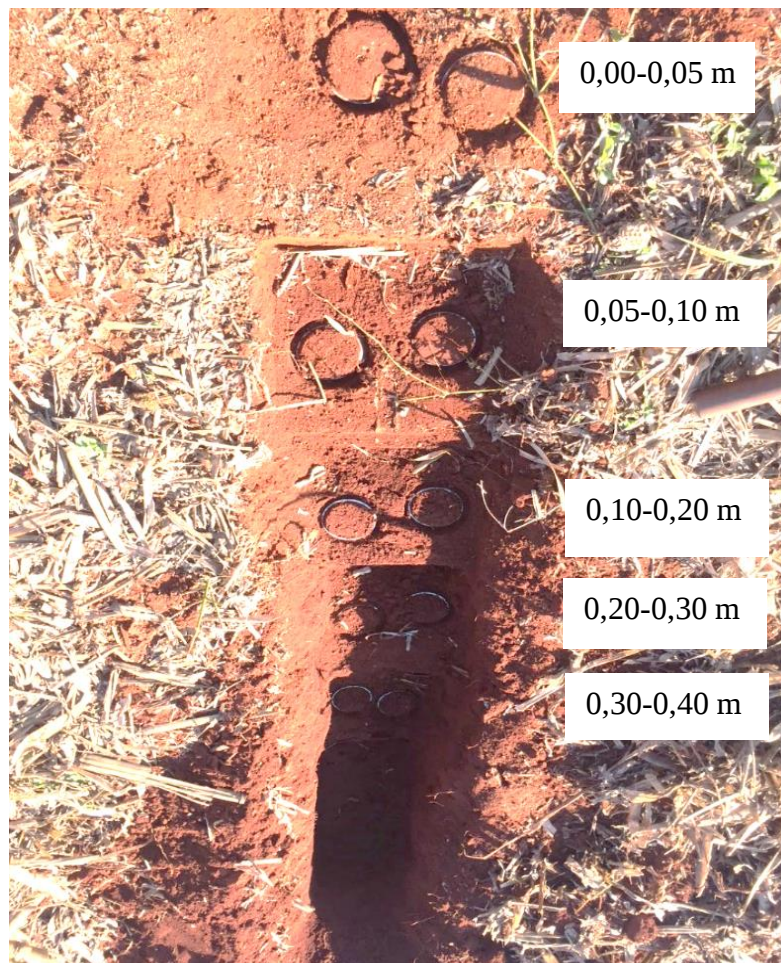


Figura 8. Mini trincheira na forma de escada com degraus nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 m, respeitando o fluxo vertical de infiltração da água, para coleta de amostras com estrutura preservada do Latossolo Vermelho Distrófico.

Após as amostras indeformadas atingirem o equilíbrio hidráulico ao Ψ_m -0,033 MPa, foram submetidas ao teste de resistência do solo à penetração, utilizando um penetrômetro de bancada da marca SHIMPO modelo FGV-250 PVL com dinamômetro digital modelo FGV-50 XY (**Figura 9**) e velocidade de deslocamento de 10 mm min^{-1} .

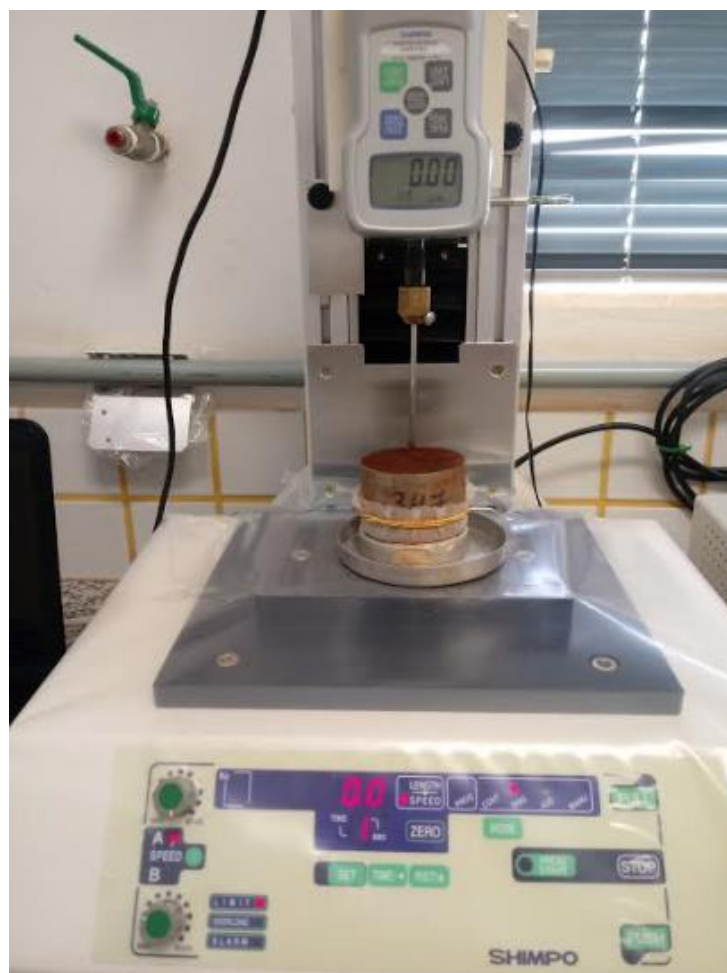


Figura 9. Amostra com estrutura do solo preservada e umidade atingida após ser submetida à Ψ_m -0,033 MPa do Latossolo Vermelho Distrófico sendo analisada quanto à resistência a penetração pelo penetrômetro de bancada marca SHIMPO modelo FGV-250 PVL.

4.5 Avaliação do carbono facilmente oxidável, carbono total, estoque de carbono e de nitrogênio do solo

O acompanhamento dos efeitos do BC no carbono do solo foi realizado coletando em zig-zag, com auxílio de trato tipo holandês, amostras deformadas do solo na área de estudo, nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, coletadas na área útil da parcela experimental uma amostra composta oriunda de cinco amostras simples, sendo o teor de carbono facilmente oxidável (C_{fo}) obtido colorimetricamente após oxidação úmida em meio ácido com dicromato segundo método descrito por CANTARELLA et al. (2001).

Para determinação de teores totais de carbono (C_{total}) e nitrogênio no solo, ao final do ciclo de cultivo do milho, foram coletadas em zig-zag cinco amostras simples deformadas na área útil de cada parcela, formando uma amostra composta para as profundidades: 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. As amostras foram secas ao ar, peneiradas em

peneiras de 10 mesh (2 mm), separadas alíquotas de aproximadamente 5 g que foram maceradas até passarem por completo em peneira de 100 mesh (0,154 mm). A determinação de carbono e nitrogênio total ocorreu por analisador elementar CN LECO.

Os estoques de carbono e nitrogênio (Mg ha^{-1}) no solo foram calculados multiplicando-se o teor total (%) de C ou N da camada analisada pela densidade (kg dm^{-3}) e espessura (cm) da mesma (BAYER et al., 2000). A análise de carbono orgânico total determinado por digestão com dicromato em bloco digestor e titulometria (RAIJ et al., 2001) foi realizada nas amostras de solo coletadas na camada 0,00-0,20 m em julho de 2017

Amostras dos tratamentos Controle, BC20, BC50 e BCP na camada 0,00-0,05 m do solo coletadas em julho de 2017 foram encaminhadas para análise isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) para caracterização da MOS, visando estimar a contribuição do BC na decomposição/acúmulo da mesma. Foi analisada amostra de BC para a comparação dos resultados de $\delta^{13}\text{C}$. A abundância isotópica de ^{13}C nas amostras de solo, biocarvão e solo + biocarvão foram determinadas como a diferença relativa, $R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})$, das amostras e amostra padrão de International Measurement Standards, obtendo valores expressos em delta (δ). Foi utilizado um analisador elementar (Carlo Erba CHN-1110, Milão, Italia) acoplado a um espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS) (Thermo Scientific Delta Plus, Bremen, Alemanha). A razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ das amostras de solo, solo + biocarvão e biocarvão foram calculadas pela equação:

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}}$$

Onde:

Ramostra é a razão isotópica de carbono $R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})$ da amostra;

Rpadrão é a razão isotópica de carbono $R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})$ da amostra de referência VPDB, $R(^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}) = 0,0111802$.

4.5 Nutrição mineral e produtividade do milho

O milho foi cultivado em dezembro de 2016 e 2017 e, para determinar os efeitos das doses de biocarvão sobre a cultura, na fase de pendoamento do milho (80% das plantas pendoadas), quatro plantas de cada parcela foram cortadas rente ao solo para determinação produção de massa seca da parte aérea. Neste mesmo período, para análise nutricional do milho, coletou-se de 12 plantas localizadas na área útil de cada parcela, a folha da base da espiga,

denominada folha diagnóstica. Tanto a parte aérea como as folhas diagnósticas, foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C, até atingirem massa constante. As amostras foram moídas em moinho tipo Willey e tiveram os teores de macronutrientes, micronutrientes e de metais pesados (P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Zn, Fe, Cd, Cr, Ni e Pb) determinados utilizando digestão com HNO₃/H₂O₂ em forno micro-ondas (ABREU, 1997) com leitura dos extratos em ICP-OES e absorção atômica. Os teores de N na folha, colmo e folha diagnóstica foram determinados pelo método Kjeldahl (APHA, 2005).

Para controle da qualidade das determinações por ICP-OES foi realizada leitura de amostra rastreada ao National Institute of Standards and Technology (NIST), sendo que em cada rodada utilizou-se um branco e a amostra Tomato Leaves 1573a.

Para produtividade, determinou-se o número de espigas produzidos nas quatro linhas centrais de cada parcela. Obteve-se a massa de grãos em cada parcela, corrigida para 13% de umidade (SILVA et al, 2008).

4.6 Análises Estatísticas

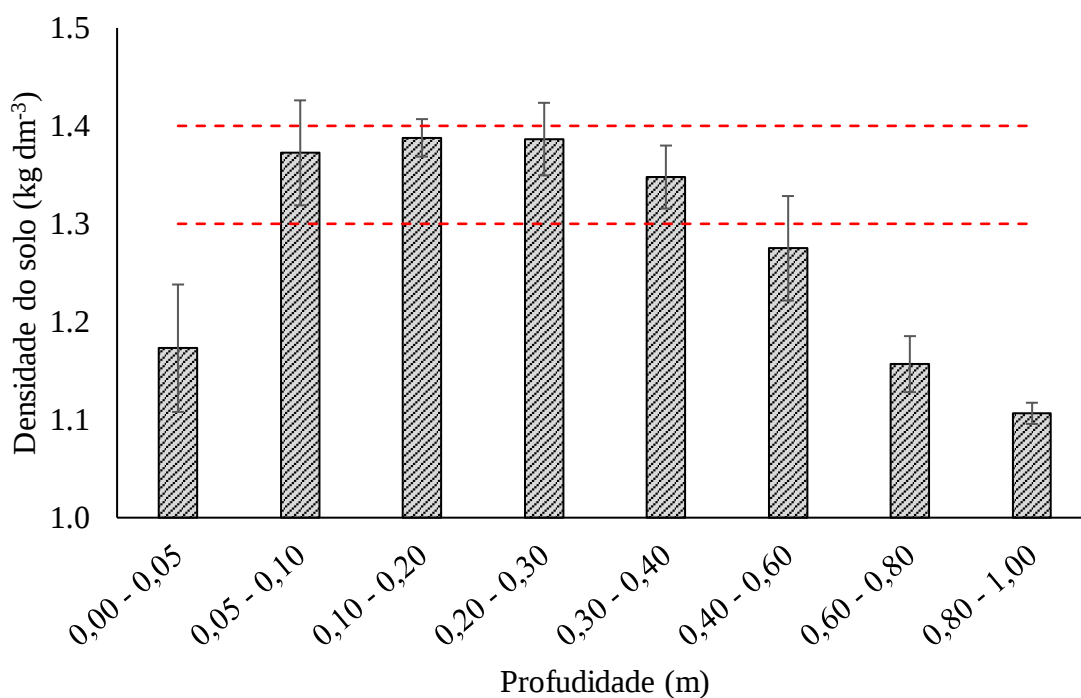
Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente por meio da análise de variância, complementada pelo teste de comparação de médias de Dunnett nível de 5% de probabilidade entre as doses e o tratamento BCP e análise de regressão para as doses de biocarvão, utilizando o software SISVAR (FERREIRA, 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A maioria dos estudos sobre a aplicação de BC no solo ocorrem em regiões de clima temperado, com solos degradados e de textura arenosa. Este experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa, sem degradação física ou química, com histórico de produtividade satisfatório e em região de clima tropical úmido, com a caracterização da área apresentada a seguir.

5.1 Caracterização da área experimental

Na **Figura 10** são apresentados os dados de densidade do solo nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m para caracterização da área experimental.



----- Faixa crítica para o desenvolvimento de raízes (REICHERT et al., 2003)

Figura 10. Densidade do solo para caracterização da área experimental até 1,00 m de profundidade. Médias (n=4) e barra de erros referentes ao desvio padrão de cada profundidade.

Foram encontradas maiores densidades nas camadas 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, justificadas pelo tráfego agrícola durante o preparo de solo, plantio, colheita e limpeza da área. A partir de 0,05 m, há um aumento na densidade do solo até 0,40 m de profundidade, decaindo a partir deste ponto. A camada 0,00-0,05 m, no entanto, apresentou

densidade inferior e estatisticamente equivalente as camadas subsuperficiais (0,60-0,80 e 0,80-1,00 m). Comportamento parecido, com densidade menor na primeira camada do solo, foi encontrado por BEUTLER et al. (2014) em Latossolo Vermelho Distrófico sob mata e cultivo de cana-de-açúcar, com valores de densidades de 1,40 (0,00-0,10 m), 1,59 (0,10-0,20 m), 1,52 (0,20-0,30 m) e 1,46 kg dm⁻³ (0,30-0,40 m) para cana de açúcar e 0,93 (0,00-0,10 m), 1,21 (0,10-0,20 m), 1,19 (0,20-0,30 m) e 1,18 kg dm⁻³ (0,30-0,40 m) para mata.

Valores de densidade crítica do solo para o desenvolvimento de raízes em solos de textura argilosa variaram de 1,30 a 1,40 kg dm⁻³ (REICHERT et al., 2003), sendo que os valores de densidade obtidos nas camadas de 0,05-0,40 m se encontram nesta faixa crítica, porém, não ultrapassam esses valores em nenhuma das profundidades em que o solo foi analisado.

Relacionada à densidade, a porosidade se comporta de maneira contrária, com os resultados para porosidade total apresentados na **Figura 11A** e a distribuição de poros na **Figura 11B**.

Os maiores valores de porosidade total foram encontrados nas camadas 0,00-0,05 m e a 0,60-0,80 m do solo, aproximando da porosidade esperada para um solo argiloso (60%) segundo DIJKERMAN (1981). ARAUJO et al. (2004), ao compararem atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico com vegetação de mata nativa e de área cultivada, encontraram no solo sob a mata nativa 43% de porosidade total na camada 0,00-0,20 m e 30% para o solo em área cultivada.

Em relação à distribuição dos poros (**Figura 11B**), indicando que, por mais que haja uma leve redução nos valores de porosidade do solo nas camadas entre 0,05-0,40 m, não atingem o limite de mínimo de macroporos (10%), não sendo severa o suficiente para inibir o crescimento radicular do milho (KLEIN, 2008).

Como a macroporosidade é responsável pela quantidade de água no solo à potenciais matriciais inferiores a -0,006 MPa, os maiores volumes de água retidos abaixo deste potencial foram nas profundidades que apresentaram maior macroporosidade (0,00-0,05 e 0,60-0,80 m). O volume de água disponível para plantas está representado pela água retida nos microporos ($-0,006 < \Psi_m < -1,500$ MPa), sendo a camada 0,00-0,05 m a com maior capacidade de reter água (13,6%) neste intervalo, seguida pelas camadas 0,05-0,10 m (12,9%), 0,60-0,80 m (12,3%) e 0,80-1,00 m (12,2%). A água retida nos criptoporos seria a água contida nos poros intra-agregados que, mesmo presente no solo, não seriam absorvidas pelas plantas. A grande porcentagem de criptoporos no solo analisado se deve, principalmente, a textura argilosa, sendo os maiores volumes de criptoporos encontrados nas profundidades com maiores teores de argila (**Tabela 2**).

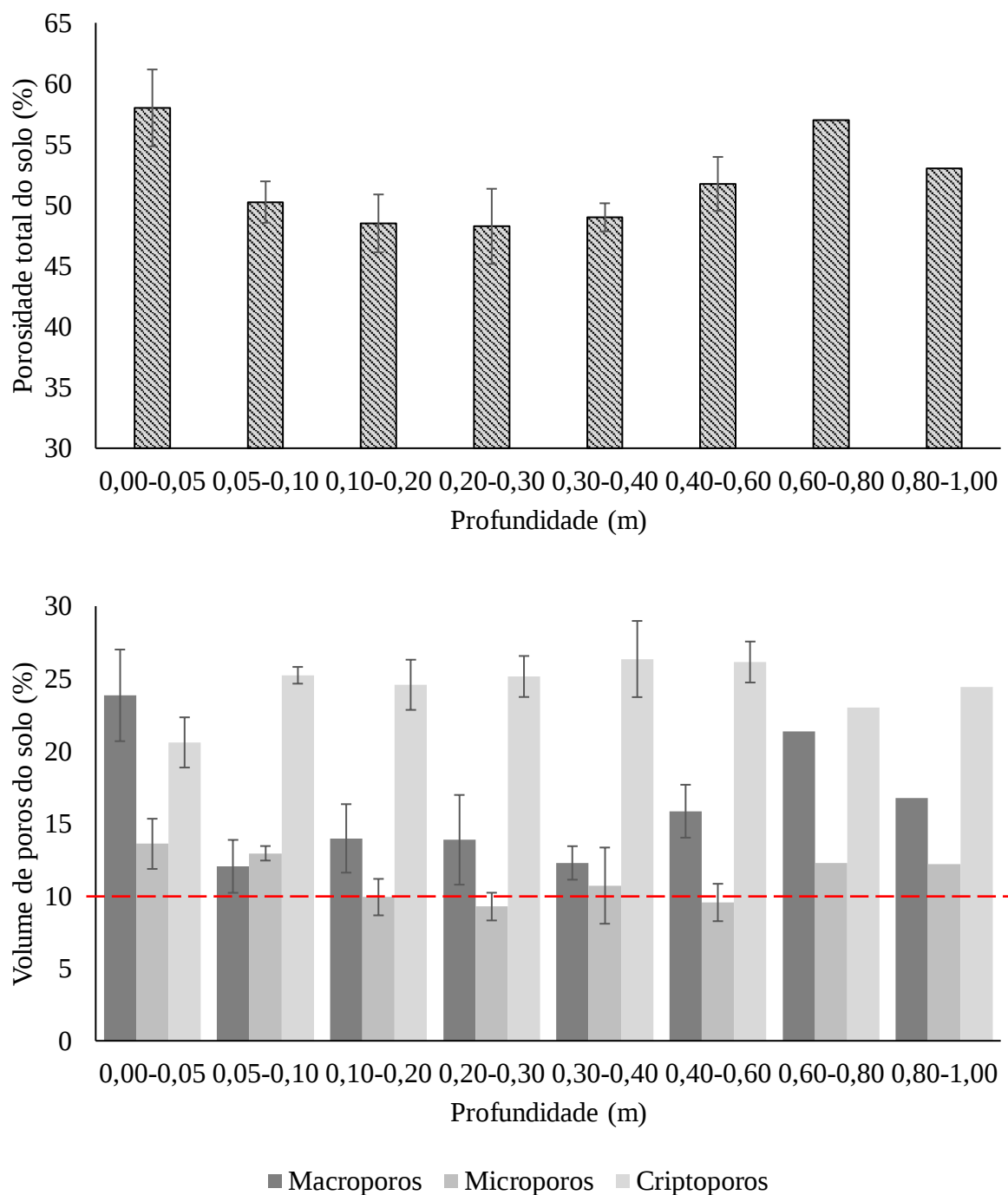


Figura 11. Porosidade total (A) e distribuição de poros (B) do solo e para caracterização da área experimental até 1,00 m de profundidade. Médias (n=4) e barra de erros referentes ao desvio padrão para as profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 e 0,40-0,60 m; valor obtido em amostra única nas profundidades 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m.

Tabela 2. Caracterização granulométrica e argila dispersa do solo até profundidade de 1,00 m para caracterização inicial da área experimental.

Profundidade M	Areia Total	Silte	Argila Total %	Argila Dispersa
0,00 – 0,05	41,7 ± 0,7	9,6 ± 0,9	48,7 ± 0,4	30,5 ± 1,8
0,05 – 0,10	41,8 ± 1,1	9,2 ± 1,0	49,1 ± 0,3	31,0 ± 1,7
0,10 – 0,20	41,2 ± 1,0	7,9 ± 0,6	50,9 ± 0,5	35,1 ± 0,7
0,20 – 0,30	39,1 ± 0,2	8,2 ± 0,9	52,7 ± 0,8	38,8 ± 1,1
0,30 – 0,40	36,5 ± 0,5	8,0 ± 1,1	55,6 ± 1,2	42,8 ± 2,9
0,40 – 0,60	34,2 ± 0,2	7,4 ± 0,9	58,4 ± 0,9	43,9 ± 4,2
0,60 – 0,80	33,3	8,4	58,3	12,9
0,80 – 1,00	34,1	8,3	57,6	0,0

Assim como a porosidade total do solo ficou abaixo da esperada para um solo argiloso, a CRA apresentou o mesmo comportamento (**Figura 12**). DIJKERMAN (1981) estima que solos de textura argilosa apresentem um teor de água igual a 50% na capacidade de campo, 35% no ponto de murcha permanente e, portanto, porcentagem de água disponível para as plantas de aproximadamente 15%. Os valores encontrados na caracterização demonstram que o solo do experimento apresenta, em média, 37% de água na capacidade de campo e cerca de 25% no ponto de murcha permanente, o que resultaria em 12% de água disponível, superior aos valores encontrados por BEUTLER et al. (2014) de 5,2% para solo sob mata e 7,9% para solo sob cultivo de algodão e cana-de-açúcar.

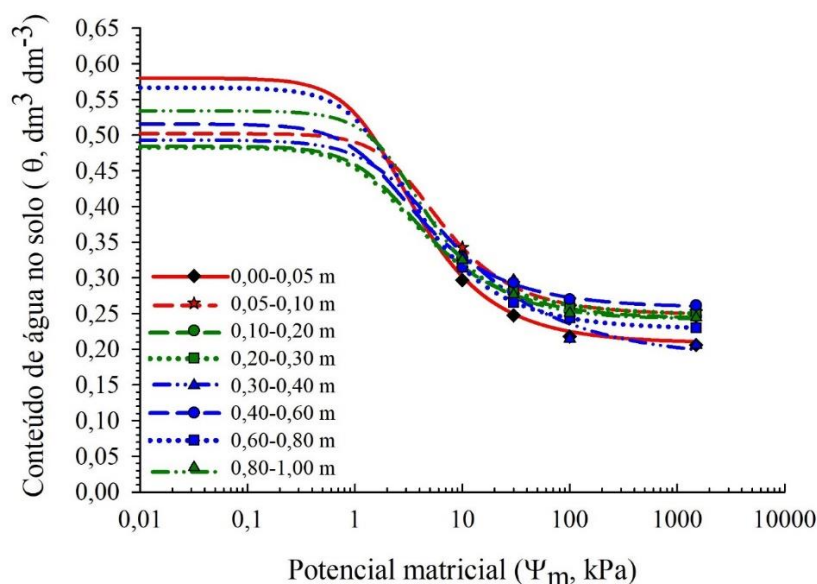


Figura 12. Curvas de retenção de água do solo em diferentes camadas até 1,00 m de profundidade para caracterização da área experimental. Médias (n=4) para as profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 e 0,40-0,60 m; valor obtido em amostra única nas profundidades 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m.

Os atributos de fertilidade do solo foram analisados nas camadas 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, com resultados apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3. Atributos de fertilidade nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m para caracterização inicial da área experimental.

Profundidade	pH	MOS ⁽¹⁾	P ⁽²⁾	K ⁽³⁾	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁵⁾	H+Al ⁽⁶⁾
M		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----	mmolc dm ⁻³	-----	
0,00-0,20	5,0±0,2	27,8±1,0	18,8±1,3	2,2±0,3	18±4	6±1	26,8±4,5
0,20-0,40	5,1±0,3	22,8±2,2	10,8±1,0	1,9±0,6	17±7	4±1	25,5±3,9

Profundidade	CTC ⁽⁷⁾	V ⁽⁸⁾	B ⁽⁹⁾	Cu ⁽¹⁰⁾	Fe ⁽¹¹⁾	Mn ⁽¹²⁾	Zn ⁽¹³⁾
m	mmolc dm ⁻³	%	-----	mg dm ⁻³	-----	-----	-----
0,00-0,20	53±1	49±8	0,3±0,0	9,7±2,2	24,8±4,9	12,9±0,5	1,8±0,3
0,20-0,40	48±6	46±10,8	0,2±0,0	8,6±0,9	19,3±5,2	8,1±1,6	0,8±0,2

Média e desvio padrão (n=4). ⁽¹⁾MOS: matéria orgânica do solo; ⁽²⁾P: fósforo; ⁽³⁾K: potássio; ⁽⁴⁾Ca: cálcio; ⁽⁵⁾Mg: magnésio; ⁽⁶⁾H+Al: acidez potencial; ⁽⁷⁾CTC: capacidade de troca de cátions; ⁽⁸⁾V: saturação por bases; ⁽⁹⁾B: boro; ⁽¹⁰⁾Cu: cobre; ⁽¹¹⁾Fe: ferro; ⁽¹²⁾Mn: manganês; ⁽¹³⁾Zn: zinco.

Os atributos de fertilidade do solo indicam que os teores de fósforo, magnésio, potássio e boro encontrados na camada de 0,00-0,20 m são considerados médios para culturas anuais (RAIJ et al., 1996). Cálcio, cobre, ferro, manganês e zinco apresentaram em altos teores. Para o teor de matéria orgânica em solo argiloso, ficou abaixo do esperado (31 a 60 g dm⁻³) conforme citados pelos mesmos autores. Os teores encontrados no solo indicam que o mesmo seria capaz de sustentar uma cultura anual, sendo que a adubação com os nutrientes encontrados na faixa de teores médios deve ocorrer apenas para manutenção desses no solo. Como há absorção desses nutrientes pelas plantas, mesmo que o teor encontrado no solo seja o suficiente para o desenvolvimento da cultura, a adubação garante que o solo permaneça apto para sustentar culturas anuais. Os elementos encontrados em altas quantidades não necessitam ser aplicados. No entanto, a acidez do solo está entre o que é considerado média/alta e o V% considerado baixo, mostrando necessidade de calagem para elevação do V% e correção do pH do solo.

O histórico da área, com cultivo de milho, sorgo, trigo e feijão, condiz com o apresentado, já que a produtividade se mostrou satisfatória mesmo sem muita intervenção. Tanto a textura como a qualidade química original do solo são condições distintas das apresentadas na maioria das pesquisas com aplicação de biocarvão, que ocorrem em solos degradados, com textura arenosa e pobres em nutrientes. TROEH e THOMPSON (2005) atribuem

o uso desses solos e a infertilidade dos mesmos ao fato de possuírem menor área superficial, razão para baixa capacidade de retenção de água e nutrientes para as plantas.

Além da análise básica de fertilidade, os teores totais de carbono e nitrogênio, para posterior cálculo do estoque no solo, seguem na **Tabela 4**.

Tabela 4. Teores totais de carbono (%) e nitrogênio (%) até 1,0 m para caracterização inicial da área experimental.

Teor total (%)	Profundidade (m)							
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	0,40-0,60	0,60-0,80	0,80-1,00
Nitrogênio	0,13±0,01	0,14±0,00	0,13±0,01	0,11±0,01	0,10±0,00	0,08±0,01	0,07±0,01	0,07±0,00
Carbono	1,68±0,18	1,70±0,08	1,52±0,16	1,35±0,12	1,20±0,05	1,05±0,06	0,90±0,11	0,76±0,04

Médias e desvio padrão (n=4).

Os estoques de carbono nas camadas 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m foram obtidos pela soma dos estoques encontrados nas camadas, sendo 43,3 e 36,9 Mg ha⁻¹, respectivamente, para comparação com os teores de MOS que foram determinados nestas mesmas camadas. Na divisão original das parcelas, o estoque de C foi de 10,9, 11,1, 21,3, 18,9 e 18,0 Mg ha⁻¹ para as camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 m.

Em relação ao estoque de carbono, os resultados obtidos foram de 43,3 e 36,9 Mg ha⁻¹ nas camadas 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, e na divisão original das parcelas de 10,9, 11,1, 21,3, 18,9 e 18,0 Mg ha⁻¹ para as camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 m. Como a área onde o experimento foi realizado tem um histórico de cultivo variado, alta produtividade e manejo adequado, os dados mostram um estoque de carbono superior aos encontrados por ROZANE et al. (2010), que obtiveram em estudo sobre o estoque de carbono nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de um Latossolo Vermelho Distrófico sob mata, pastagem e cultivo de milho, 15,4 (mata), 16,5 (pastagem) e 15,8 (milho) Mg ha⁻¹ para a camada 0,00-0,10 m, 11,3 (mata), 14,9 (pastagem) e 13,5 (milho) Mg ha⁻¹ para a camada 0,10-0,20 m e 10,7 (mata), 12,2 (pastagem) e 9,7 (milho) Mg ha⁻¹ para a camada 0,20-0,30 m.

5.2 Caracterização do biocarvão

Como o biocarvão utilizado no experimento é um subproduto da indústria de carvão vegetal, conhecido também como fino de carvão, as análises tanto químicas como físicas foram realizadas de forma a comprovar que o material utilizado se enquadra nas especificações de biocarvão. Para essa avaliação, foi utilizada a amostra coletada durante a separação das doses do BC (**Figura 13**).



Figura 13. Amostra de biocarvão de eucalipto, resíduo da produção de carvão vegetal carbonizado em forno de alvenaria à 350 °C, coletada para caracterização do biocarvão.

Na análise granulométrica, 9,4% do biocarvão ficou retido na peneira de 10 mesh (2 mm), 34,3% na de 20 mesh (0,841 mm) e 23,2% na de 50 mesh (0,297 mm). O restante das partículas, 33,1%, apresentou granulometria inferior a 0,297 mm. Segundo o IBI (2015), a distribuição do tamanho das partículas deve ser apresentada na caracterização do BC, mas não apresenta restrição para essa distribuição.

Para determinação da área superficial, utilizou-se o método BET- N₂, obtendo o valor de 41,77 m² g⁻¹. Esse valor foi semelhante ao encontrado por YARGICOGU et al. (2015) que, ao analisar BC de Pinus pirolisado a 400 °C, obteve com área superficial 40,63 m² g⁻¹. Os autores ainda analisaram outros tipos de BC, dando destaque para a área superficial do BC de coco (611,87 m² g⁻¹). O IBI (2015) não exige esse tipo de análise e para o EBC (2012), apesar de exigida, não há um valor limitante, sendo preferencialmente superior a 150 m² g⁻¹, mas aceitando valores inferiores a esse. As faixas de adsorção do nitrogênio são apresentadas na **Figura 14**, obtida por software ligado ao equipamento.

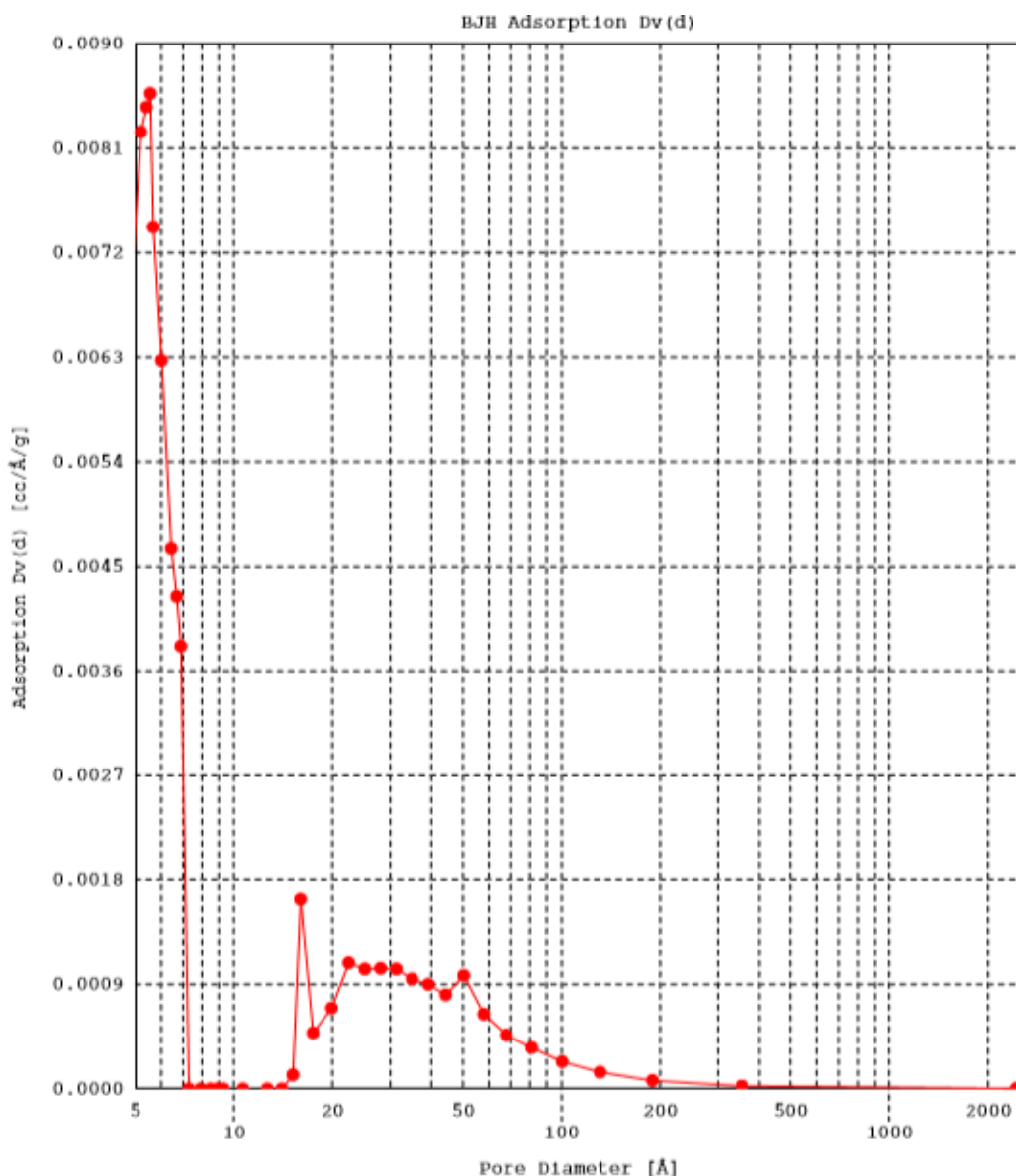


Figura 14. Diâmetro dos poros do biocarvão conforme faixa de adsorção de nitrogênio.

Os resultados sobre a distribuição de poros do biocarvão indicaram uma faixa de alta adsorção de nitrogênio em poros de até 0,07 nm e outra faixa de adsorção em poros de 1,5 a 10 nm, indicando presença predominando de micro (menores que 2 nm) e mesoporos (entre 2 e 50 nm). Segundo MUKHERJEE e LAL (2013), o impacto do biocarvão como condicionador de solo depende, entre outras propriedade e atributos, da área superficial e presença de microporos no BC, contribuindo para as propriedades adsorptivas e alterando a área superficial do solo, distribuição de poros, densidade, capacidade de retenção de água e resistência à penetração. A amostra também foi submetida a microscopia eletrônica de varredura (**Figura 15**), mostrando que o biocarvão mantém a estrutura porosa e linear do vegetal, com poros em formato cilíndrico e elíptico.

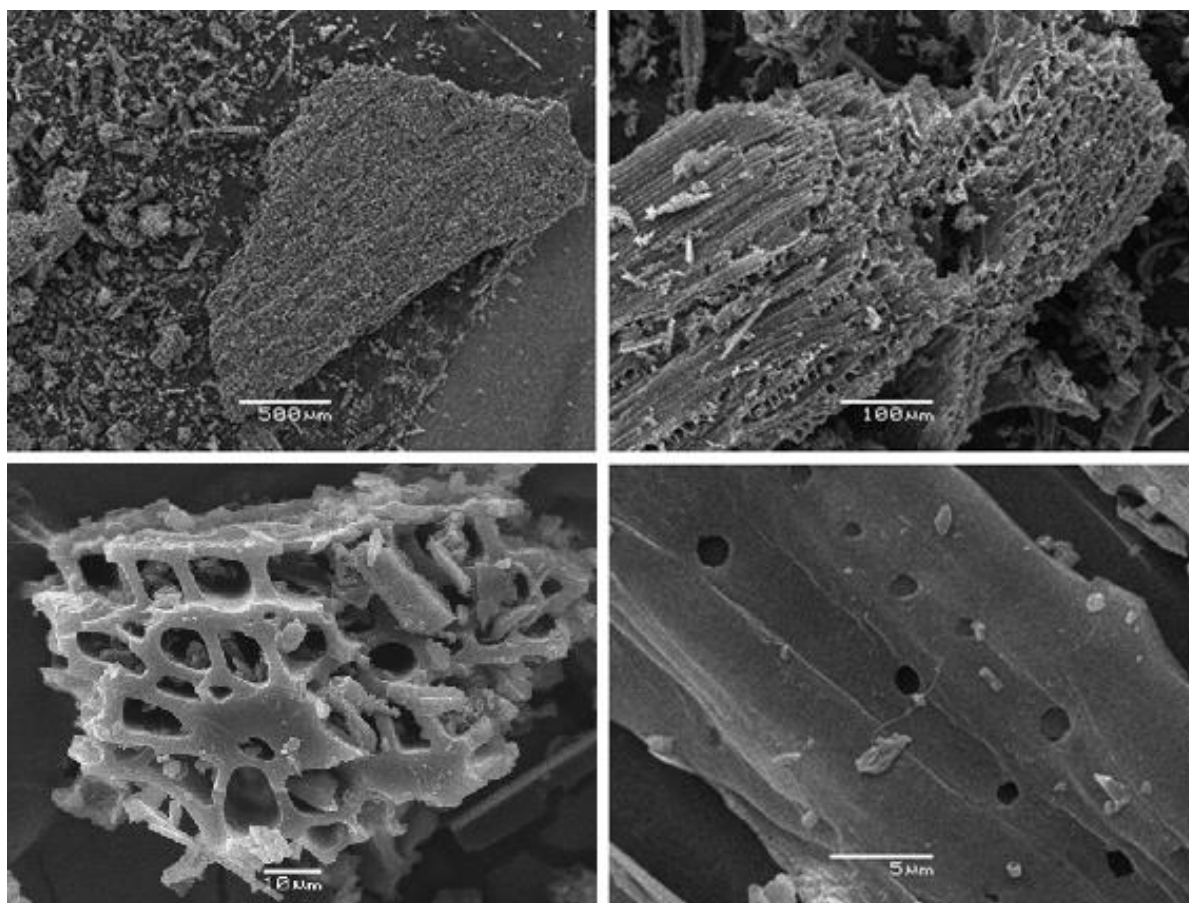


Figura 15. Microscopia eletrônica de varredura do biocarvão de eucalipto, resíduo da produção de carvão vegetal carbonizado em forno de alvenaria à 350 °C.

Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) elementar do biocarvão obtidos foram de $66,1 \pm 0,6\%$ de carbono, $2,24 \pm 0,04\%$ de hidrogênio e $1,10 \pm 0,03\%$ de nitrogênio. O teor de cinzas obtido foi de 5,51%, totalizando 25,05% de oxigênio (O). As relações molares H/C e O/C do biocarvão são, respectivamente, 0,40 e 0,28. Essas relações medem intrinsicamente a estabilidade do BC. Para o IBI (2015), a relação molar H/C deve ser menor que 0,7, garantindo uma grande proporção de anéis aromático em sua estrutura. Esse valor ainda é utilizado para distinguir biocarvão de outras biomassas que não sofreram alteração termoquímica parcial ou foram alteradas apenas parcialmente.

Outras características químicas do BC como teores de metais pesados, carbono orgânico (C_{org}), pH e umidade obtidos são apresentados a seguir na **Tabela 5**, estando o biocarvão utilizado no experimento de acordo com os parâmetros apresentados no IBI (2015).

Tabela 5. Análise química do biocarvão de eucalipto.

Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾	Resultado	Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾	Resultado
pH (em água 1:10)	-----	7,6±0,0	Alumínio	mg kg ⁻¹	1858±57
Umidade, a 60 – 65 °C	% (m m ⁻¹)	7,7±0,1	Boro	mg kg ⁻¹	3,3±1,1
Sólidos Totais	% (m m ⁻¹)	92,9±0,4	Cádmio	mg kg ⁻¹	<0,4 ⁽²⁾
Sólidos Voláteis	% (m m ⁻¹)	49,8±0,2	Cálcio	g kg ⁻¹	27,1±1,0
Carbono Orgânico	g kg ⁻¹	499±5	Chumbo	mg kg ⁻¹	<3,0 ⁽²⁾
Nitrogênio Kjeldahl	g kg ⁻¹	9,4±0,1	Cobre	mg kg ⁻¹	13,7±0,5
Nitrogênio amoniacal	mg kg ⁻¹	59,7±2,0	Cromo total	mg kg ⁻¹	10,3±0,3
Nitrogênio nitrato-nitrito	mg/kg	32,7±4,2	Enxofre	g kg ⁻¹	0,9±0,1
CTC	mmol _c kg ⁻¹	79,5±0,1	Ferro	mg kg ⁻¹	1286±85
Arsênio	mg kg ⁻¹	10,4±0,4	Fósforo	g kg ⁻¹	1,5±0,2
Bário	mg kg ⁻¹	38,1±3,8	Magnésio	g kg ⁻¹	1,3±0,1
Mercúrio	mg kg ⁻¹	<1,0 ⁽²⁾	Manganês	mg kg ⁻¹	275±8,8
Potássio	mg kg ⁻¹	6380±88	Molibdênio	mg kg ⁻¹	<0,9 ⁽²⁾
Selênio	mg kg ⁻¹	<1,0 ⁽²⁾	Níquel	mg kg ⁻¹	<2,4 ⁽²⁾
Sódio	mg kg ⁻¹	1094±53	Zinco	mg kg ⁻¹	40,3±9,7

Média e desvio padrão (n=2). ⁽¹⁾ Resultados expressos na amostra em base seca. ⁽²⁾ Não detectado, concentrações menores que o limite de detecção.

Em relação a solubilidade em água dos principais nutrientes presentes no BC, apenas 2,3% do cálcio (617±80 mg kg⁻¹), 1,1% do nitrogênio (92±6 mg kg⁻¹), 6; 8% do fósforo (123±9 mg kg⁻¹); 25% do K (1577±130 mg kg⁻¹) e 23% do Mg (306±33 mg kg⁻¹) são solúveis em água e, portanto, estariam disponíveis para as plantas ou sujeitos a lixiviação.

Referentes aos valores de arsênio, cádmio, chumbo, mercúrio, níquel e selênio obtidos no biocarvão estão abaixo dos limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo (arsênio = 20 mg kg⁻¹; cádmio = 3 mg kg⁻¹; chumbo = 150 mg kg⁻¹; mercúrio = 1 mg kg⁻¹; níquel = 70 mg kg⁻¹; selênio = 80 mg kg⁻¹) da IN SDA nº 7 (BRASIL, 2016). Para atingir os valores estipulados pela Resolução CONAMA 375/06 de carga acumulada teórica permitida (kg ha⁻¹), seria necessária aplicação de 2880 Mg ha⁻¹ de BC, atingindo apenas o valor limitante de contaminação do solo para o arsênio (30 kg ha⁻¹).

A capacidade de troca de cátions (CTC) do biocarvão determinada pelo método oficial do MAPA para fertilizantes e corretivos (BRASIL, 2007), foi igual a 79,5 mmol_c kg⁻¹. Pelo método modificado de deslocamento por acetato de amônio, segundo GASKIN et al. (2008), o valor obtido foi de 247,49 mmol_c kg⁻¹. ANDRADE et al. (2015) também relatam a diferença significativa nos valores de CTC conforme o método de determinação, sendo que a CTC do BC de cama de frango determinada pelo método oficial para fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo (BRASIL, 2007) situou-se em torno de 41% do valor determinado com o uso de acetato de amônio, relatando que os valores encontrados neste segundo método são mais próximos de outros citados na literatura para biocarvão de cama de frango. As diferenças

nos valores de CTC entre os dois métodos se devem ao fato de que pelo método oficial do MAPA, após a saturação dos sítios de troca com Ca^{2+} , o deslocamento do mesmo ocorre por meio de lavagem da amostra com água deionizada e o segundo método, após a saturação da amostra com íons Na^+ , o deslocamento dos íons adsorvidos nos sítios de troca é forçado com o uso de acetato de amônio na lavagem. O método do MAPA ainda utiliza a titulação para determinação indireta da CTC e o método de deslocamento por acetato de amônio determina diretamente a CTC pelo teor de Na^+ no lixiviado por fotometria de chama. O método de análise seria um fator importante para o registro de BC como condicionador de solos. A CTC obtida pelo método oficial do MAPA (BRASIL, 2007) limitaria o registro do BC como condicionador de solos, diferentemente da obtida pelo método modificado de deslocamento por acetato de amônio, ressaltado que este é mais apropriado para obter a CTC do biocarvão devido a sua estrutura e composição.

Para BC de madeira, NELISSEN et al. (2014) encontraram CTC igual a $463 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. DOMINGUES et al. (2017) encontraram valor de CTC igual a $108 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para BC de eucalipto pirolisado a 350°C , constatando diminuição da CTC do BC de eucalipto conforme o aumento na temperatura de pirolise.

5.2.1. Capacidade de retenção de água do biocarvão

A capacidade de retenção de água do biocarvão submetido ao potencial matricial de $-0,001 \text{ MPa}$ foi igual a $63,73\%$ (kg dm^{-3}), estando de acordo com o valor exigido pelo MAPA ($> 60\%$) para registro como condicionador de solos. BIBAR (2014), encontrou uma capacidade de retenção de água para biocarvão de eucalipto, de 80 e 81% (kg dm^{-3}), com temperatura de pirólise de 400 e 700°C , respectivamente.

Como o biocarvão não possui métodos de análises específicas, não há padronização nas unidades de apresentação dos dados para sua caracterização, sendo, em geral, apresentados em $\%$ (kg kg^{-1}). No caso da retenção de água, e unidade gravimétrica (kg kg^{-1}) é utilizada na apresentação de dados referentes ao uso em substratos, enquanto que a unidade volumétrica (kg dm^{-3}) permite comparação do biocarvão com condicionados de solo e com a capacidade de retenção de água do próprio solo.

Os valores de retenção de água, tanto em base volumétrica como em base gravimétrica, para os potenciais matriciais aos quais o biocarvão foi submetido podem ser verificados na **Tabela 6**.

Tabela 6. Capacidade de retenção de água do biocarvão de eucalipto, resíduo da produção de carvão vegetal carbonizado em forno de alvenaria a 350 °C, submetido à diferentes tensões matriciais.

CRA ⁽¹⁾	Potencial matricial (MPa)								
	0,000 ⁽²⁾	-0,0005	-0,001	-0,002	-0,006	-0,010	-0,033	-0,100	-1,500
% (kg kg ⁻¹) ⁽³⁾	241,8±7,6	220,1±3,5	187,8±0,5	184,9±4,6	131,5±10,9	122,6±12,8	65,9±0,9	40,0±0,5	37,6±0,9
% (kg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	73,2±3,0	67,6±2,2	63,7±0,4	57,2±1,9	40,1±3,0	37,6±3,4	20,5±1,4	11,6±0,6	11,4±1,1

Média e desvio padrão (n=5). ⁽¹⁾ CRA = capacidade de retenção de água; ⁽²⁾ saturação; ⁽³⁾ massa de água retida por unidade de massa de biocarvão seco em estufa de circulação forçada à 65 °C por 48 horas; ⁽⁴⁾ massa de água retirada por unidade de volume de biocarvão seco em estufa de circulação forçada à 65 °C por 48 horas. Água = 1 dm³ = 1 kg.

YARGICOGLU et al. (2015), em um processo de análise diferente do proposto pelo método utilizado, encontraram, para diferentes biocarvões, valores de CRA entre 50,6% e 179,4% (kg kg⁻¹), sendo o valor encontrado para BC de pinus (pirólise lenta à 400 °C) foi de 120,6% (kg kg⁻¹). SONG e GUO (2012) em estudo sobre a influência da temperatura de pirólise nas características de BC de cama de frango, encontraram valores entre 88 e 110% (kg/kg) para biocarvões produzidos a temperaturas de pirólise de 300 a 600 °C.

O biocarvão é citado como um material que pode ser utilizado para aumentar a capacidade de retenção de água do solo. No entanto, estudos sobre a capacidade de retenção de água de biocarvões, assim como sua interferência nos atributos físicos do solo, são bastante escassos, principalmente em solos tropicais. Além disso, o processo de compreensão dos mecanismos que influenciam as características dos biocarvões é lento devido ao fato de serem derivados de diferentes biomassas em diferentes processos de produção.

5.3 Atributos químicos e físicos do solo

Referente aos tratamentos, as doses de biocarvão incorporadas na camada de 0,00-0,20 m do solo representam aplicação de até 33 Mg ha⁻¹ de C (25 Mg ha⁻¹ de C_{org}), 1,4 Mg ha⁻¹ de Ca, 550 kg ha⁻¹ de N, 75 kg ha⁻¹ de P, 320 kg ha⁻¹ de K e 65 kg ha⁻¹ de Mg, doses muito superiores às apresentadas por RAU et al. (1996) como orientação de adubação para a cultura de milho com produção de 6 a 8 Mg ha⁻¹ (100 kg ha⁻¹ de N; 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 50 kg ha⁻¹ de K₂O). No entanto, apenas uma pequena parcela está prontamente disponível ou solúvel em água, sendo 31 kg de Cálcio, 6 kg de fósforo, 79 de potássio e 15 kg de magnésio 31 kg ha⁻¹ de Ca, 4,6 kg ha⁻¹ de N, 6 kg ha⁻¹ de P, 79 kg ha⁻¹ de K e 15 kg ha⁻¹ de Mg.

Por mais que a dose máxima de biocarvão (50 Mg ha⁻¹) tenha acrescentado 5,5 vezes a quantidade de N recomendada, 3,5 vezes a de P e 7,7 vezes a de K, devido ao baixo teor disponível e à alta estabilidade e recalcitrância do BC, foi realizada a adubação mineral com

formulação NPK (4-20-20) e sulfato de amônio na dose recomendada para a cultura do milho. Os atributos de fertilidade na camada 0,00-0,20 m conforme tratamento com BC controle após 14 meses de aplicação são apresentados na **Tabela 7**, os resultados da camada 0,20-0,40 m são apresentados no **Anexo 2**.

Os dados obtidos após 14 meses de interação do BC no solo indicam aumento linear do pH do solo na camada 0,00-0,20 m em função da dose de BC aplicada. Esse resultado ocorreu provavelmente pelo efeito da mistura do solo (ácido – pH 4,8) com o BC (alcalino – pH 7,6), já que se trata de um material recalcitrante e pouco reativo. Resultado semelhante foi encontrado por SILVA et al. (2011), em experimento de campo onde a adição de biocarvão de madeira (32 Mg ha^{-1}) e adubação nitrogenada (30 kg N ha^{-1}), favoreceu a elevação do pH do solo de 4,20 para 4,86.

Houve efeito de dose no teor de cálcio do solo que era originalmente alto, resultado esperado já que as doses de cálcio aplicadas no solo via BC foram altas, chegando a $1,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ no tratamento BC50. Assim com o cálcio, a saturação por bases (V%) também cresceu linearmente com o aumento da dose de BC, resultado esperado já que esta variável é dependente do Ca. Os demais atributos de fertilidade do solo não sofreram alteração com as doses aplicadas.

Tabela 7. Atributos médios de fertilidade do Latossolo Vermelho Distrófico para camada de 0,00-0,20 m em função das doses de biocarvão após 14 meses da aplicação.

Parâmetro		Controle	Tratamento					CV%	Regressão			Tratamento BCP	CV%	DMS
			BC10	BC20	BC30	BC40	BC50							
MOS	g dm ⁻³	24,5	21,0	27,0	26,9	29,0	25,3	8,99	Y = 0,079 X + 23,643	R ² = 0,29	P = 0,011	21,5	8,44	3,97
pH		4,8	4,9	4,8	4,8	5,0	5,1	2,45	Y = 0,006 X + 4,726	R ² = 0,75	P = 0,001	4,8	2,30	0,21
P	mg dm ⁻³	16,3	20,3	27,3	22,3	21,8	19	29,10		ns		15,3	29,43	9,37
K	mmolc dm ⁻³	2,4	3	2,5	2,7	3,1	3,1	20,02		ns		2,5	19,36	1,01
Ca	mmolc dm ⁻³	21	24	21	20	24	27	9,26	Y = 0,102 X + 20,408	R ² = 0,49	P = 0,001	19	10,87	4,56
Mg	mmolc dm ⁻³	5	6	6	5	5	6	11,33		ns		5	10,80	1,13
CTC	mmolc dm ⁻³	59	59	60	57	61	61	2,96		ns		54	3,59	3,96
V	%	49	53	50	49	53	58	6,85	Y = 0,131 X + 48,524	R ² = 0,47	P = 0,008	48	6,59	6,36

Significativo, $P \leq 0,05$; ns = não significativo ($P > 0,05$). DMS = diferença mínima significativa calculada pelo teste de Dunnett. ⁽¹⁾MOS = matéria orgânica do solo; ⁽²⁾P = fósforo; ⁽³⁾K = potássio; ⁽⁴⁾Ca = cálcio; ⁽⁵⁾Mg = magnésio; ⁽⁶⁾CTC = capacidade de troca de cátions; ⁽⁹⁾V = saturação por bases. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 20 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta.

As doses de BC não interferiram na CTC de solo. Algumas amostras de solo foram analisadas segundo o método de deslocamento de acetato de amônio (GASKIN et al., 2008), conforme apresentado na **Figura 16**, não indicando alteração na CTC com a adição de BC.

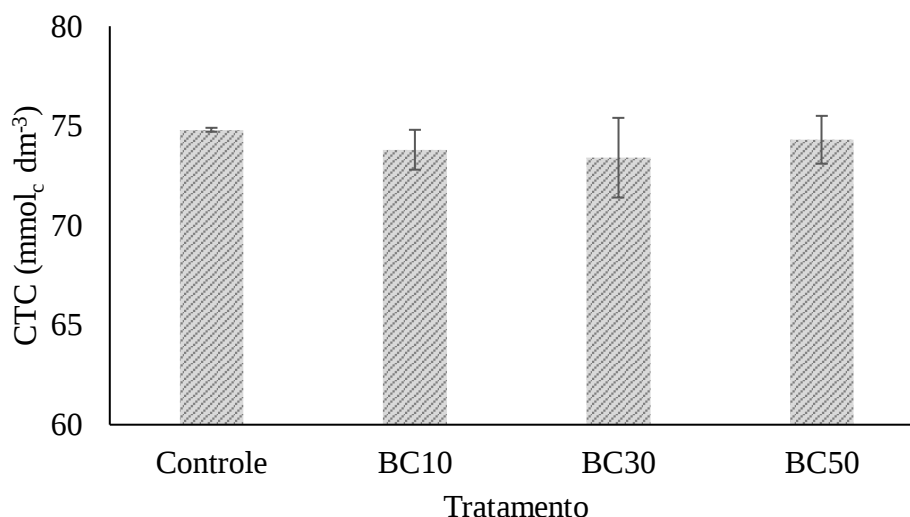


Figura 16. Capacidade de troca de cátions do solo (mmol_c dm⁻³) determinada pelo método de deslocamento de Na⁺ com acetato de amônio (GASKIN et al., 2008), conforme tratamento com BC, após 14 meses de aplicação. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC e BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC. Média (n=4) e barras de erros referentes ao desvio padrão de cada tratamento.

Resultados obtidos sobre a CTC de biocarvões são bastante variados, conforme o método de determinação utilizado, que varia entre os adaptados para solo, material orgânico, dentre vários outros (GASKIN et al., 2007; MUKHERJEE e ZIMMERMAN, 2013; BIBAR, 2014; ANDRADE et al., 2015). Mesmo com o método alternativo de determinação da CTC, não houve efeito de dose neste atributo do solo. Na produção do biocarvão, as cadeias alifáticas que compõem a estrutura das biomassas de origem vão sendo condensadas em anéis aromáticos, que contém vários grupos funcionais oxigenados em suas superfícies (CHENG et al., 2006). Para biocarvões oriundos de materiais ligno-celulósicos, sua porosidade está relacionada à grande área superficial adquirida depois do processo de pirólise, em que a porosidade do material é aumentada consideravelmente, e essa alta densidade de poros faz com que a superfície de trocas do material seja ainda maior (GLASER et al., 2002).

Como solos de textura arenosa e baixo teor de matéria orgânica apresentam menores valores de CTC que solos argilosos e com maiores teores de MO (OLIVEIRA, 2011), a interferência do acréscimo de BC nos primeiros proporciona maiores modificações nos

atributos do solo, sendo a maioria das pesquisas com BC desenvolvidas nestes, como observado por CHENG et al. (2006); GASKIN et al. (2007) e YUAN e XU (2011), que identificaram aumento na CTC em solo em função de doses de biocarvão aplicadas, enquanto BREWER et al. (2011) e MÉNDEZ et al. (2012) não encontraram alteração na CTC do solo devido à aplicação de BC.

Após o segundo cultivo de milho, houve uma nova coleta de solo para análise de fertilidade na camada 0,00-0,20 m com os atributos apresentados na **Tabela 8**, os resultados da camada 0,20-0,40 m são apresentados no **Anexo 3**.

As análises da segunda coleta de solo mostram efeito de dose nos teores de P e K, ambos com comportamento quadrático e teores máximos atingidos no tratamento BC30 (22,3 mmol_c dm⁻³ de P e 3,9 mmol_c dm⁻³ de K). Acompanhando o teor de K, a saturação por bases (V%) apresentou o mesmo comportamento com o aumento da dose de BC. Uma das possibilidades da aplicação do BC no solo, além do fornecimento direto dos nutrientes para as plantas como um fertilizante, seria a liberação gradual destes elementos ou ainda adsorção de nutrientes acrescentados via fertilizante mineral, representando um estoque dos nutrientes no solo, no entanto, isso promoveria incremento linear nos nutrientes conforme aumento da dose de BC aplicada, o que não aconteceu. Resultados sobre a avaliação nutricional e produtividade do milho serão apresentados posteriormente no item **5.5 Nutrição mineral e produtividade do milho**.

Esta segunda amostragem ocorreu 28 meses após a aplicação de BC no solo e após 3 aplicações parceladas de BC no tratamento BCP. No entanto, comparando os tratamentos que receberam dose única de BC e que tiveram o processo de envelhecimento durante estes 28 meses com o tratamento BCP, que recebeu sua última dosagem de BC em 8 meses antes da coleta, o envelhecimento do BC no solo não provocou alteração na fertilidade.

Nesta segunda amostragem foram avaliados os atributos físicos do solo. A porosidade é um dos atributos físicos do solo que pode ser alterada pela adição de biocarvão devido a sua alta porosidade e interação com a MOS. Alterações na porosidade do solo interferem na aeração, condução e retenção da água, resistência do solo à penetração e à ramificação das raízes e, consequentemente, no aproveitamento de águas e nutrientes pelas plantas.

Tabela 8. Atributos de fertilidade do solo médios na camada 0,00-0,20 m em tratamentos com diferentes doses de biocarvão após 28 meses da aplicação.

Parâmetro		Controle	Tratamento					CV%	Regressão	Tratamento BCP	CV%	DMS
			BC10	BC20	BC30	BC40	BC50					
MOS	g dm ⁻³	37,8	37,0	36,8	37,8	37	37,3	4,44	ns	35,8	4,14	2,87
pH		4,5	4,5	4,6	4,7	4,5	4,6	2,31	ns	4,7	2,13	0,18
P	mg dm ⁻³	9,7	13	15,8	22,3	13,8	13,5	20,89	$Y = -0,011X^2 + 0,641X + 8,920$ $R^2 = 0,66$ $P = 0,000$	13,3	20,10	5,46
K	mmolc dm ⁻³	3,3	2,5	3,5	3,9	3,2	2,9	14,86	$Y = -0,001X^2 + 0,077X + 2,408$ $R^2 = 0,63$ $P = 0,005$	3,4	13,66	0,82
Ca	mmolc dm ⁻³	25	28	25	28	26	29	10,99	ns	26	10,90	5,41
Mg	mmolc dm ⁻³	6	6	7	7	6	7	11,41	ns	6	13,53	1,54
CTC	mmolc dm ⁻³	73	75	74	76	76	78	3,62	ns	69	3,67	5,13
V	%	45	50	50	50	46	49	4,45	$Y = -0,005X^2 + 0,282X + 45,813$ $R^2 = 0,40$ $P = 0,010$	50	4,60	4,18

Significativo, $P \leq 0,05$; ns = não significativo ($P > 0,05$). DMS = diferença mínima significativa calculada pelo teste de Dunnett ($P \leq 0,05$). ⁽¹⁾MOS = matéria orgânica do solo; ⁽²⁾P = fósforo; ⁽³⁾K = potássio; ⁽⁴⁾Ca = cálcio; ⁽⁵⁾Mg = magnésio; ⁽⁶⁾CTC = capacidade de troca de cátions; ⁽⁹⁾V = saturação por bases. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta.

Os poros do solo são representados por cavidades de diferentes tamanhos ocupadas por ar e solução do solo. Segundo ANDERSON e BOUMA (1973), para se entender o comportamento do solo, a distribuição dos poros por seus tamanhos é mais importante que a porosidade total, isso porque, enquanto os macroporos são responsáveis pela drenagem e aeração do solo, os microporos (poros capilares) são responsáveis pela retenção de água disponível para as plantas. Os dados de macro e microporosidade do solo conforme tratamento com BC são apresentados na **Tabela 9**.

Esperava-se que o acréscimo de BC influenciasse a macroporosidade por promover interações e agregação no solo. Em solos de textura argilosa a tendência é que os microporos predominem devido ao tamanho das partículas de argila, sendo que, quando há agregação do solo, cria-se novos poros, geralmente maiores entre os agregados, aumentando a macroporosidade do solo. A microporosidade seria alterada principalmente pela presença física do BC e de seus microporos, que proporcionariam aumento na retenção de água do solo. No entanto, efeitos do BC na macro e microporosidade do solo foram observados apenas na camada 0,05 - 0,10 m. Mesmo que de forma discreta (coeficiente angular 0,07 para macroporos e 0,05 para microporos) e com um ajuste inferior a 50%, houve incremento linearmente proporcional ao aumento na dose de BC aplicada. Esse incremento pode favorecer o desenvolvimento das culturas, já que o aumento na macroporosidade é uma melhoria do solo em termos de aeração e drenagem de água e o da microporosidade proporciona maior quantidade de água disponível para as plantas. Em relação ao tratamento BCP, houve diferença apenas da dose BC50 para o parâmetro de microporosidade nesta mesma camada, indicando que o tempo de permanência do BC no solo não influenciou no comportamento do mesmo em relação a esses atributos.

Resultados sobre a influência do BC na porosidade do solo foram apresentados por DEMPSTER et al. (2012), que em experimento conduzido em casa de vegetação com adição 2,2% de BC de eucalipto, dose semelhante a dose máxima (BC50 – 2,5% de BC) utilizada neste experimento, encontrou aumento de 8% na porosidade total de um solo arenoso. KARHU et al. (2011) relataram aumento de 2% da porosidade total de um solo de textura franco-arenosa em experimento de campo, com aplicação de 1,2% de biocarvão de madeira, dose similar a aplicada no tratamento BC30. Neste experimento, utilizando a equação de ajuste obtida para a porosidade total do solo (**Tabela 10**), a aplicação de 1,2 e 2,5% de BC proporcionaram aumento de 2,1 e 3,5% respectivamente na porosidade total na camada 0,05-0,10 m do solo. Nas demais camadas, não houve efeito do BC na porosidade total, macro e microporosidade do solo.

Tabela 9. Macroporosidade e microporosidade do solo nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m em tratamentos com diferentes doses de biocarvão após 28 meses da aplicação.

Profundidade (m)	Controle	BC10	BC20	BC30	BC40	BC50	CV%	Regressão			BCP Macroporos (%)	CV%	DMS
Macroporos (%)													
0,00 - 0,05	22	22	26	22	22	24	10,40	ns			27	10,42	4,60
0,05 - 0,10	16	15	10	18	18	20	12,34	Y = 0,07X + 16,10	R ² = 0,46	P = 0,021	18	13,75	4,59
0,10 - 0,20	13	12	15	12	13	15	14,33	ns			13	15,58	3,90
0,20 - 0,30	15	17	15	16	15	15	13,85	ns			13	13,92	3,96
0,30 - 0,40	15	15	17	14	14	14	13,81	ns			15	12,87	3,55
Microporos (%)											Microporos (%)		
0,00 - 0,05	17	16	16	15	16	17	13,09	ns			17	12,76	3,86
0,05 - 0,10	14	13	12	14	14	17	11,00	Y = 0,05X + 12,85	R ² = 0,40	P = 0,020	13	10,65	2,80
0,10 - 0,20	17	16	17	19	15	17	12,38	ns			17	11,42	3,58
0,20 - 0,30	15	14	14	14	12	14	12,56	ns			15	11,93	3,15
0,30 - 0,40	14	12	13	12	12	13	11,41	ns			11	20,16	4,71

Significativo, $P \leq 0,05$; ns = não significativo ($P > 0,05$). DMS = diferença mínima significativa calculada pelo teste de Dunnett ($P \leq 0,05$). Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta.

Tabela 10. Porosidade total do solo nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m em tratamentos com diferentes doses de biocarvão após 28 meses da aplicação.

Profundidade (m)	Controle	BC10	BC20	BC30	BC40	BC50	CV%	Regressão			BCP Porosidade (%)	CV%	DMS
			Porosidade (%)										
0,00 - 0,05	56	56	59	53	57	58	4,07	ns			59	3,89	4,16
0,05 – 0,10	50	50	52	52	52	54	3,07	Y = 0,07X + 49,81	R ² = 0,83	P = 0,001	50	3,24	3,14
0,10 – 0,20	49	49	52	51	49	51	3,10	ns			50	3,53	3,32
0,20 – 0,30	50	51	50	51	49	49	4,17	ns			48	4,20	3,92
0,30 – 0,40	49	49	50	49	49	48	3,23	ns			47	4,23	3,85

Significativo, $P \leq 0,05$; ns = não significativo ($P > 0,05$). DMS = diferença mínima significativa calculada pelo teste de Dunnett ($P \leq 0,05$). Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta.

Os resultados referentes a capacidade de retenção de água solo, conforme tratamento com BC, nos Ψ_m de 0,000, -0,006, -0,033 e -1,500 MPa e profundidade de coleta do solo apresentados na **Tabela 11**.

Tabela 11. Umidade volumétrica média do solo até 0,40 m de profundidade e potencias matriciais de 0,000, -0,006, -0,033 e -1,500 MPa conforme tratamento com biocarvão, após 28 meses de aplicação no solo.

Tratamento	Umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
	0 MPa	-0,006 MPa	-0,033 MPa	1,500 MPa
0,00-0,05 m				
Controle	0,56 ± 0,01	0,34 ± 0,03	0,27 ± 0,02	0,18 ± 0,02
BC10	0,56 ± 0,03	0,34 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,18 ± 0,02
BC20	0,58 ± 0,01	0,32 ± 0,02	0,25 ± 0,01	0,17 ± 0,02
BC30	0,53 ± 0,04	0,32 ± 0,02	0,24 ± 0,04	0,17 ± 0,02
BC40	0,57 ± 0,01	0,35 ± 0,02	0,27 ± 0,02	0,19 ± 0,01
BC50	0,58 ± 0,01	0,34 ± 0,02	0,26 ± 0,02	0,16 ± 0,03
BCP	0,59 ± 0,01	0,32 ± 0,03	0,27 ± 0,02	0,16 ± 0,02
0,05-0,10 m				
Controle	0,50 ± 0,02	0,34 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,20 ± 0,02
BC10	0,50 ± 0,01	0,34 ± 0,02	0,29 ± 0,02	0,21 ± 0,02
BC20	0,52 ± 0,02	0,32 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,19 ± 0,02
BC30	0,52 ± 0,02	0,34 ± 0,03	0,29 ± 0,02	0,20 ± 0,02
BC40	0,52 ± 0,02	0,34 ± 0,03	0,29 ± 0,01	0,20 ± 0,01
BC50	0,54 ± 0,03	0,34 ± 0,02	0,28 ± 0,01	0,18 ± 0,03
BCP	0,51 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,29 ± 0,01	0,20 ± 0,02
0,10-0,20 m				
Controle	0,49 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,27 ± 0,01	0,19 ± 0,01
BC10	0,49 ± 0,01	0,37 ± 0,02	0,28 ± 0,01	0,21 ± 0,02
BC20	0,52 ± 0,02	0,36 ± 0,02	0,27 ± 0,02	0,20 ± 0,02
BC30	0,51 ± 0,02	0,39 ± 0,01	0,29 ± 0,02	0,20 ± 0,04
BC40	0,49 ± 0,02	0,36 ± 0,03	0,28 ± 0,01	0,21 ± 0,02
BC50	0,51 ± 0,00	0,36 ± 0,03	0,27 ± 0,01	0,19 ± 0,02
BCP	0,50 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,29 ± 0,01	0,20 ± 0,01
0,20-0,30 m				
Controle	0,50 ± 0,02	0,35 ± 0,02	0,28 ± 0,02	0,20 ± 0,00
BC10	0,51 ± 0,03	0,34 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,20 ± 0,02
BC20	0,50 ± 0,01	0,35 ± 0,01	0,28 ± 0,02	0,20 ± 0,01
BC30	0,51 ± 0,02	0,35 ± 0,02	0,29 ± 0,02	0,21 ± 0,03
BC40	0,49 ± 0,02	0,35 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,22 ± 0,02
BC50	0,49 ± 0,03	0,34 ± 0,02	0,29 ± 0,02	0,20 ± 0,01
BCP	0,48 ± 0,03	0,36 ± 0,01	0,29 ± 0,02	0,21 ± 0,02
0,30-0,40 m				
Controle	0,49 ± 0,03	0,34 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,21 ± 0,02
BC10	0,48 ± 0,02	0,33 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,21 ± 0,02
BC20	0,50 ± 0,01	0,34 ± 0,00	0,28 ± 0,01	0,21 ± 0,01
BC30	0,48 ± 0,03	0,34 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,22 ± 0,03
BC40	0,49 ± 0,04	0,34 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,22 ± 0,02
BC50	0,48 ± 0,02	0,34 ± 0,02	0,28 ± 0,01	0,22 ± 0,01
BCP	0,47 ± 0,04	0,33 ± 0,04	0,27 ± 0,04	0,21 ± 0,02

Médias e desvio padrão (n = 4). Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC.

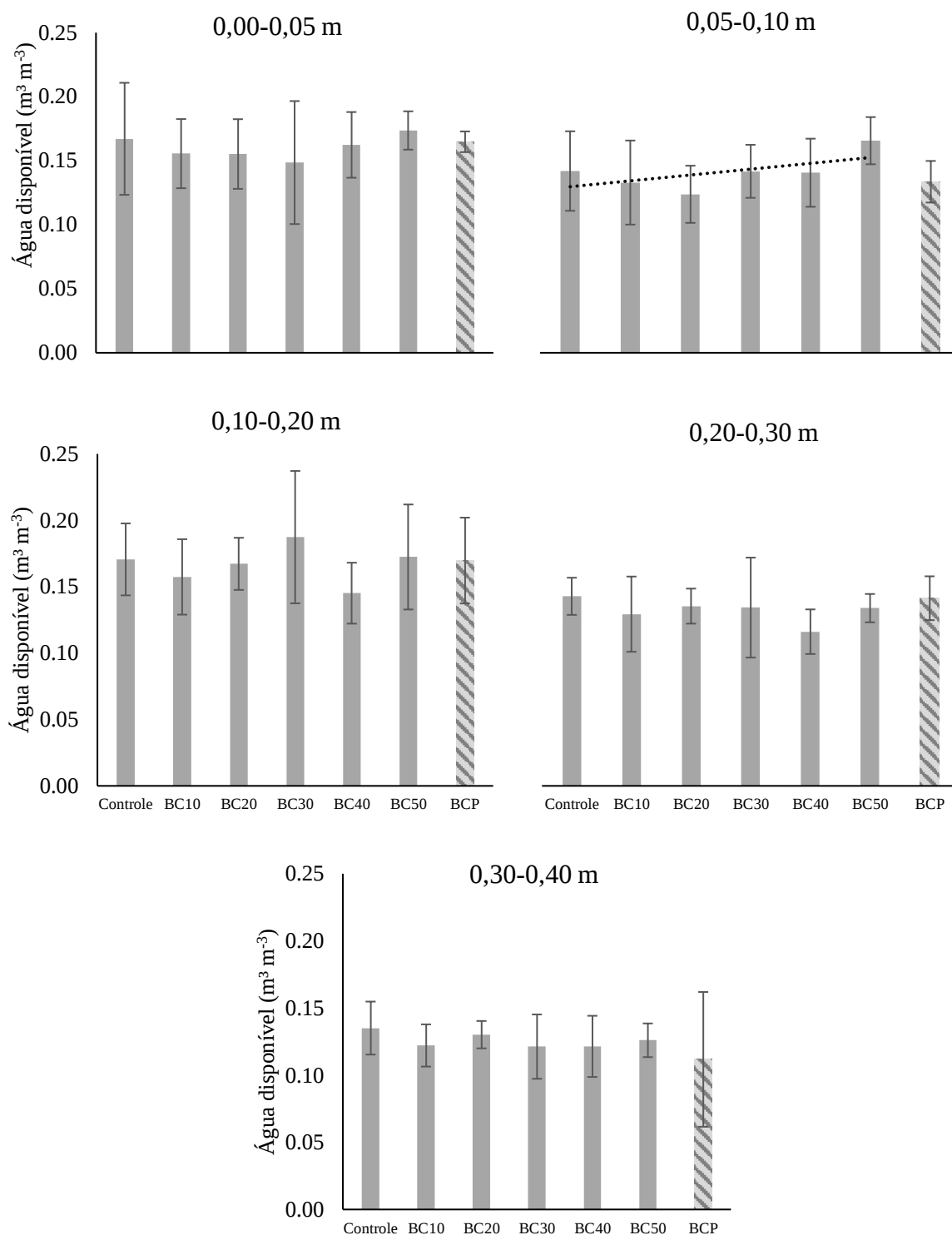
A capacidade de campo ($\Psi_m = -0,006$ MPa) é a quantidade de água retida pelo solo, depois que o excesso é drenado. Ponto de murcha permanente ($\Psi_m = -1,500$ MPa) é o teor de água já não disponível para as plantas, limitando seu desenvolvimento. Desta forma, entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) está a água disponível para o desenvolvimento das culturas. Os valores de água disponível para as plantas conforme tratamento com BC são apresentados na **Figura 17**.

Acompanhando o comportamento da porosidade total, macro e microporosidade, houve aumento na quantidade de água disponível para as plantas em função da dose de BC aplicada ao solo. O aumento seria equivalente a $0,023 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, um incremento de 11500 litros ha^{-1} no tratamento BC50 quando comparado ao tratamento Controle (camada 0,05-0,10 m). Esse incremento, no entanto, não é o suficiente para beneficiar culturas como a do milho, onde a demanda por água é considerada alta, em nenhuma fase de desenvolvimento. Culturas como a do trigo, que demandam menores quantidades de água, seriam beneficiadas por esse incremento principalmente na fase de estabelecimento e perfilhamento, com necessidade hídrica de 0,70 e 0,93 mm dia^{-1} (7000 e 9300 litros ha^{-1}), respectivamente (LIBARDI e COSTA, 1997).

A capacidade de retenção de água do BC para os Ψ_m de 0,000, -0,006, -0,033 e -1,500 MPa foram de 0,73, 0,40, 0,21 e $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo superiores aos valores encontrados no solo para os Ψ_m de 0,000, -0,006 e inferiores aos valores obtidos para o solo a Ψ_m de -0,033 e -1,500 MPa. Desta forma, o acréscimo de BC no solo poderia resultar no aumento da CRA do solo + BC em potenciais matriciais inferiores a -0,006 MPa e diminuição da CRA da mistura solo + BC em potenciais matriciais igual e superiores a -0,033 MPa, efeito observado apenas na camada 0,05-0,10 m.

O tempo de permanência, no entanto, não alterou os atributos físicos do solo, comparando o tratamento BCP (30 Mg ha^{-1} de BC aplicados até o momento da coleta) com o BC30. A discreta interferência do BC nos atributos físicos do solo é justificada pelo fato do experimento estar instalado sobre solo de textura argilosa que se caracterizam por apresentarem alta retenção, fazendo com que solos desta classe textural sejam menos susceptíveis a alterações devido adição de BC, mesmo que os pequenos poros do BC possam reter fortemente a água (KRULL et al., 2004).

Em experimento com aplicação de BC em solos de diferentes texturas, TRYON (1948) não encontrou diferença da CRA de um solo franco-arenoso. O autor ainda relata aumento na CRA de solo arenoso, diminuição em solo argiloso. No entanto, o experimento foi conduzido em condições laboratoriais e com dose de BC aplicada de 45% ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), muito superior à dose máxima de 7,6% ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) utilizada neste experimento (tratamento BC50).



..... Regressão linear referente às doses BC, camada 0,05-0,10 m. ($Y = 0,001 X + 0,13$; $R^2 = 0,37$; $P = 0,023$).

Figura 17. Água disponível para as plantas conforme profundidade e dose de biocarvão aplicada. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC aplicado no momento da coleta. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).

Outros autores também relataram aumento na CRA do solo devido ao acréscimo de BC (BUSSCHER et al., 2010; BRIGGS et al., 2012; CASE et al., 2012; LIU et al., 2012; NOVAK et al., 2012), destacando KAMMAN et al. (2011), que encontraram um aumento de 23,9 e 36,1% na CRA do solo com adição de 100 e 200 Mg ha⁻¹ de biocarvão de quinoa, respectivamente, e ALKHASHA et al. (2018), que encontrou aumento na CRA de até 8,12% em baixas tensões. No entanto, como na maioria dos experimentos, o ensaio ocorreu em condições controladas de temperatura e umidade e com solo de textura arenosa.

Para solos de textura argilosa, VERHEIJEN et al. (2010) relatam que efeito oposto deve ser esperado, onde a hidrofobicidade do biocarvão se sobressaiu, diminuindo a CRA do solo após adição do biocarvão. Em experimento de campo com cultivo de arroz, CARVALHO (2015) confirmou esta teoria, indicando que houve mudanças na porosidade e estrutura de um solo argiloso após 2,5 anos da aplicação do biocarvão, levando a uma diminuição na CRA do solo.

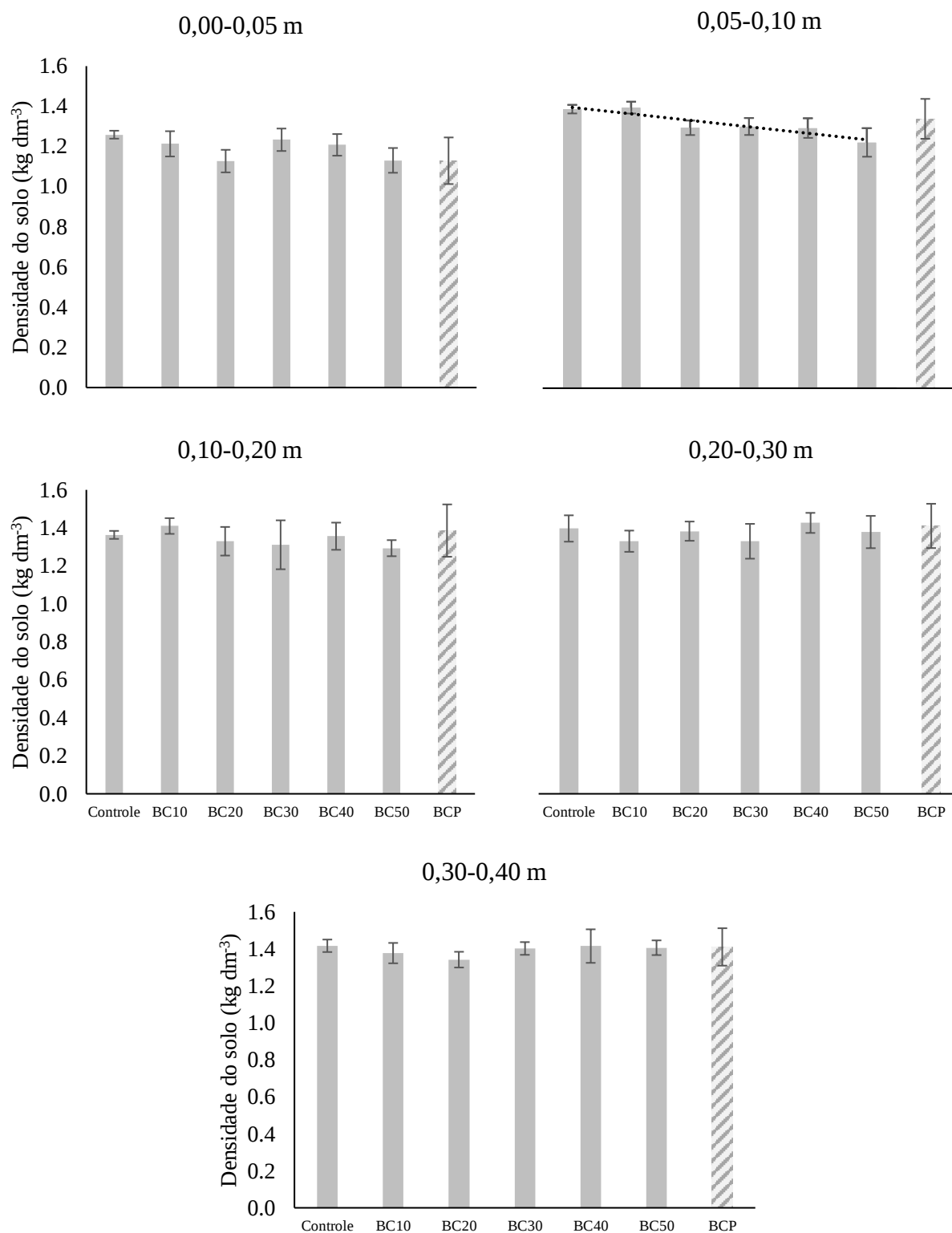
Os dados da **Tabela 11** foram obtidos utilizando mesas de tensão e câmaras de Richards, que simulam tensões que o solo é submetido e que resultam na perda de água. Contudo, corroborando com esses dados, a umidade do solo no momento da coleta, que é o comportamento do solo sob influência de fatores naturais, interações com a planta e com a atmosfera também não diferenciou conforme o tratamento com BC (**Tabela 12**) e profundidades do solo em que o mesmo foi incorporado.

Tabela 12. Umidade atual do Latossolo Vermelho Distrófico nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m conforme tratamento com biocarvão.

Tratamento	Umidade atual do solo (m ³ m ⁻³)		
	0,00-0,05 m	0,05-0,10 m	0,10-0,20 m
Controle	0,20 ± 0,02	0,24 ± 0,01	0,25 ± 0,00
BC10	0,20 ± 0,02	0,25 ± 0,01	0,26 ± 0,01
BC20	0,17 ± 0,03	0,23 ± 0,01	0,27 ± 0,06
BC30	0,18 ± 0,03	0,24 ± 0,01	0,26 ± 0,01
BC40	0,18 ± 0,02	0,26 ± 0,02	0,26 ± 0,01
BC50	0,18 ± 0,02	0,25 ± 0,01	0,25 ± 0,01
BCP	0,19 ± 0,04	0,24 ± 0,01	0,26 ± 0,01

Médias e desvio padrão (n = 4). Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ aplicados até o momento da coleta.

O BC utilizado apresentou densidade de 0,33 kg dm⁻³, três à quatro vezes menor que a densidade do solo apresentou nas camadas onde o BC foi incorporado (0,00-0,20 m) e os valores de densidade do solo nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m conforme tratamento com BC são apresentados na **Figura 18**.



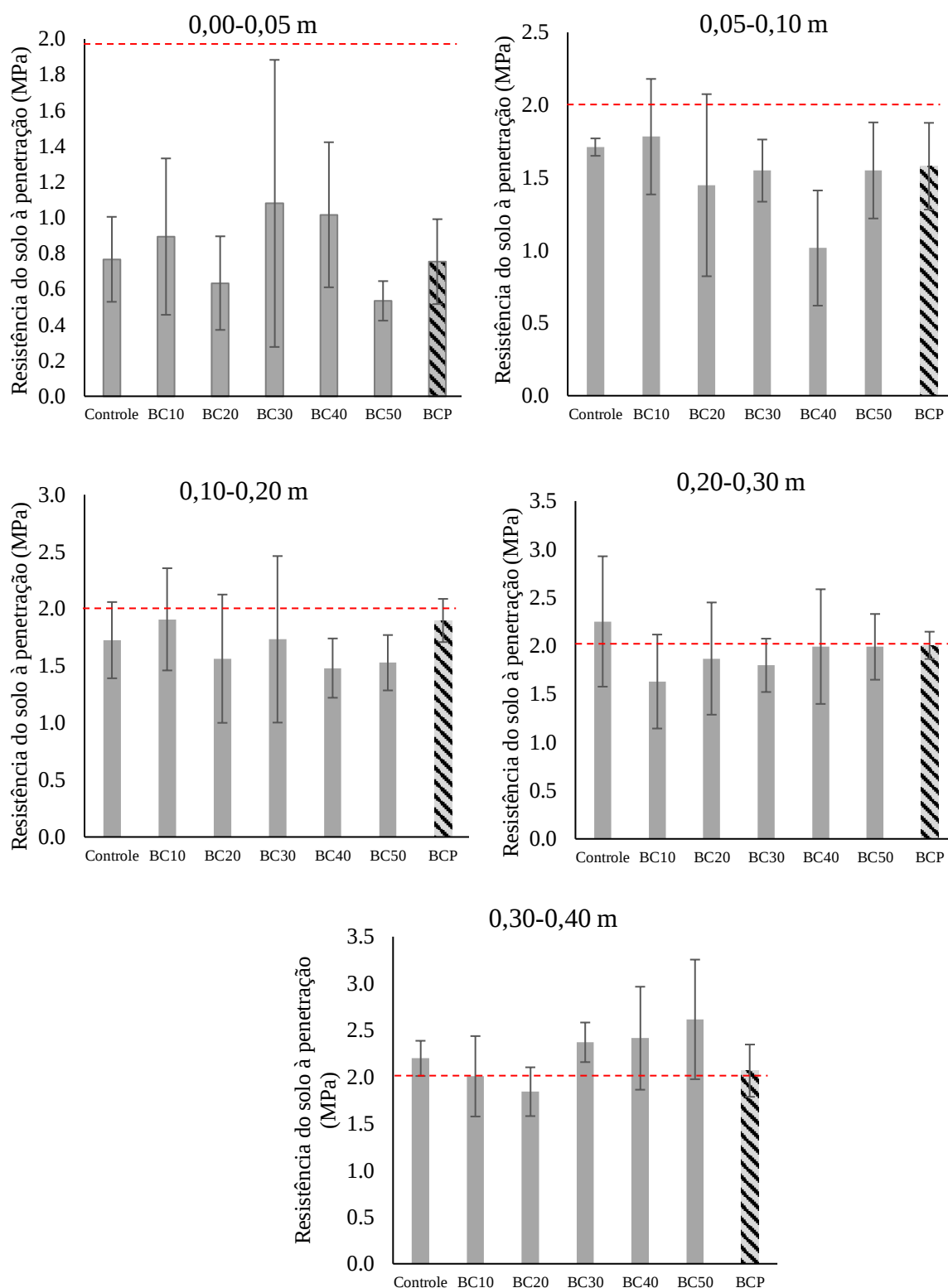
..... Regressão linear referente às doses BC ($Y = -0,0321X + 1,4228$; $R^2 = 0,85$; $P = 0,000$).

Figura 18. Densidade do solo conforme tratamento com biocarvão 28 meses após a aplicação, até 0,40 m de profundidade. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$)

Da mesma forma que o acréscimo de BC no solo e o tempo de permanência influenciaram a porosidade total, macro e microporosidade do solo apenas na camada 0,05-0,10 m, houve decréscimo nos valores de densidade do solo nesta camada conforme o aumento da dose de BC aplicada, resultado esperado já que porosidade e densidade são atributos inversamente proporcionais. A maior dose aplicada de BC (50 Mg ha⁻¹) acrescentou o equivalente a 2,5% de BC ao solo, proporcionando, na camada 0,05-0,10 m uma diminuição na densidade do solo de 0,07 kg dm⁻³ conforme médias estimadas (1,23 kg dm⁻³ para o tratamento controle e 1,16 kg dm⁻³ para o tratamento BC50), não sendo, no entanto, suficiente para provocar modificações nas demais camadas do solo. Atentando para experimentos de campo, ZHANG et al. (2012), utilizando dose de 40 Mg ha⁻¹ de BC, após dois anos da aplicação em área de cultivo de arroz, constatou diminuição na densidade de solo em 0,10 kg dm⁻³ no primeiro ano de plantio e 0,06 kg dm⁻³ no segundo ano de plantio. A densidade do solo onde o autor conduziu seu experimento era de 1,1 kg dm⁻³ e a do BC utilizado 0,65 kg dm⁻³. Mesmo que o acréscimo de BC ao solo não provocasse alterações na agregação, era esperada que pelo menos pelo fato da incorporação de um material de baixa densidade ao solo, a densidade da mistura solo + BC fosse inferior ao solo sem BC em todas as camadas onde houve incorporação.

Relacionada à densidade do solo, resistência do solo à penetração conforme tratamento com BC foi analisada nas mesmas amostras utilizadas para a determinação da densidade e, os resultados obtidos nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, com umidade do solo equilibrada ao $\Psi_m = -0,033$ MPa são apresentados na **Figura 19**.

O BC não afetou significativamente a resistência do solo à penetração, da mesma forma que relatado por MUKHERJEE et al. (2014), que não constataram efeito da adição de biocarvão (0,5% kg kg⁻¹) na resistência à penetração de um solo argiloso. Em solo de textura arenosa, BUSSCHER et al. (2010) constataram diminuição de resistência à penetração com o acréscimo de BC, sendo 1,04 MPa para o tratamento controle e 0,82 MPa para o tratamento que recebeu 20 g kg⁻¹ de BC no solo, aproximadamente 40 Mg ha⁻¹ de BC. Ainda assim, dados sobre a interferência do BC na resistência do solo à penetração são escassos e, em sua maioria, oriundos de experimentos conduzidos em laboratório e com solos de textura arenosa.

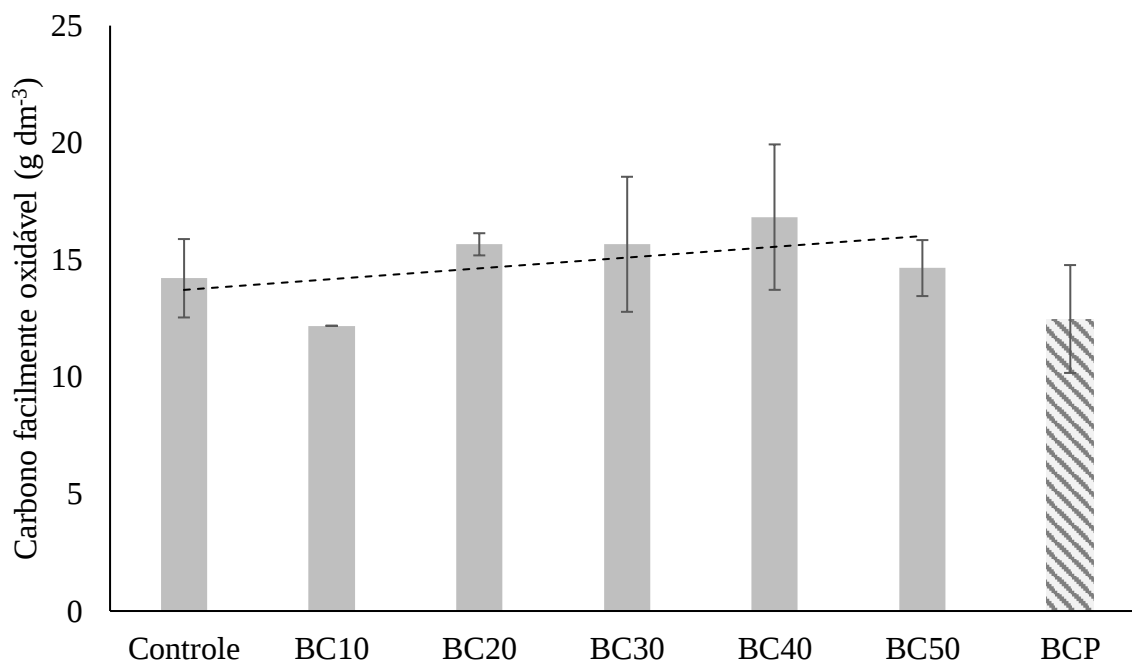


----- Valor limitante ao crescimento e desenvolvimento de sistemas radiculares (TORMENA et al., 1998)

Figura 19. Resistência do solo à penetração conforme tratamento com biocarvão, nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. Intervalo de confiança (significativo, $P < 0,05$). Umidade do solo equilibrada após ser submetido à $\Psi_m -0,033$ MPa. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC na coleta.

5.4 Carbono facilmente oxidável, carbono total, estoque de carbono e de nitrogênio do solo

Os teores de carbono facilmente oxidável (C_{fo}) foram determinados ao final de cada safra agrícola (2016/17 e 2017/18), com os dados da primeira coleta, 14 meses após a adição de BC, apresentados na **Figura 20**.



- - - - Regressão linear referente às doses BC ($Y = 0,046 X + 13,254$; $R^2 = 0,29$; $P = 0,011$).

Figura 20. Carbono facilmente oxidável (g dm⁻³) do solo na camada 0,00-0,20 m após a safra 2016/17 de milho conforme tratamento com biocarvão. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 20 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).

Houve aumento nos teores de C_{fo} do solo linearmente proporcional à dose de BC aplicada ($C_{fo} = 0,046 BC + 13,254$; $R^2 = 0,29$; $P = 0,011$). Alguns estudos indicam que o acréscimo de biocarvão no solo provoca alteração da dinâmica de decomposição da MOS, podendo acelerar ou retardar o processo. Efeito *priming* negativo sobre a decomposição da MOS foi observado por RITTIL et al. (2015), RIAZ et al. (2017) e YOUSAF et al. (2018), em experimentos de vaso, e WENG et al. (2015), em experimento de campo, relatando uma taxa de decomposição mais lenta da matéria orgânica do solo com o acréscimo do biocarvão. Resultado semelhante a este estudo foi encontrado por PURAKAYASTHA et al. (2016), que concluíram que

o acréscimo de biocarvão no solo não proporcionou efeito *priming* positivo ou negativo na decomposição de MOS, mas que são necessários estudos mais amplos, pois os efeitos dependem da biomassa de origem do biocarvão, temperatura e tempo de queima e da qualidade de matéria orgânica do solo.

No entanto, os efeitos sobre a matéria orgânica do solo foram mais conclusivos com a análise de isótopos de carbono. O biocarvão é oriundo exclusivamente de eucalipto que, assim como nas demais espécies arbóreas, é uma planta de ciclo fotossintético C3 e a cultura estudada é o milho que, como a maioria das gramíneas, é uma planta de ciclo fotossintético C4. Plantas de ciclo C3 apresentam processo fotossintético com absorção de CO₂ mais rápida, acaba assimilando melhor o isótopo mais leve do carbono, no caso o carbono 12. Nas plantas C4, o processo fotossintético ocorre na bainha vascular, onde o dióxido de carbono (CO₂) fica concentrado, permitindo maior assimilação de carbono 13 que nas plantas C3, gerando MO com diferentes concentrações isotópicas e possibilitando a avaliação da interferência do acréscimo do biocarvão na matéria orgânica do solo bem como sua interação com os restos culturais do milho. O BC utilizado possui razão isotópica $\delta^{13}\text{C}$ com valor médio de -25,7 ‰, mais negativo que o do milho (~ -13,0 ‰). A razão isotópica dos tratamentos é apresentada na **Tabela 13**.

Tabela 13. Razão isotópica $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do biocarvão, solo sem BC e solo + biocarvão na camada 0,00-0,05 m após 14 meses de aplicação.

	Biocarvão	Controle	BC20	BC50	BCP
$\delta^{15}\text{N}$	5,14	6,32	6,12	6,03	6,10
%N	0,06	0,14	0,16	0,16	0,15
$\delta^{13}\text{C}$	-25,71	-18,87	-21,14	-22,77	-21,48
%C	2,31	1,92	2,73	3,38	2,62
C/N	40,04	13,41	17,08	21,58	17,78

Controle = tratamento sem BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 20 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta.

A análise isotópica ocorreu na camada 0,00-0,05 m do solo após a primeira safra de milho (2016/17), não havendo interferência na decomposição da matéria orgânica original do solo ou mesmo acrescida ao solo pela cultura do milho, já que os teores de carbono não oriundos de BC são estatisticamente equivalentes para todos os tratamentos (**Figura 21**).

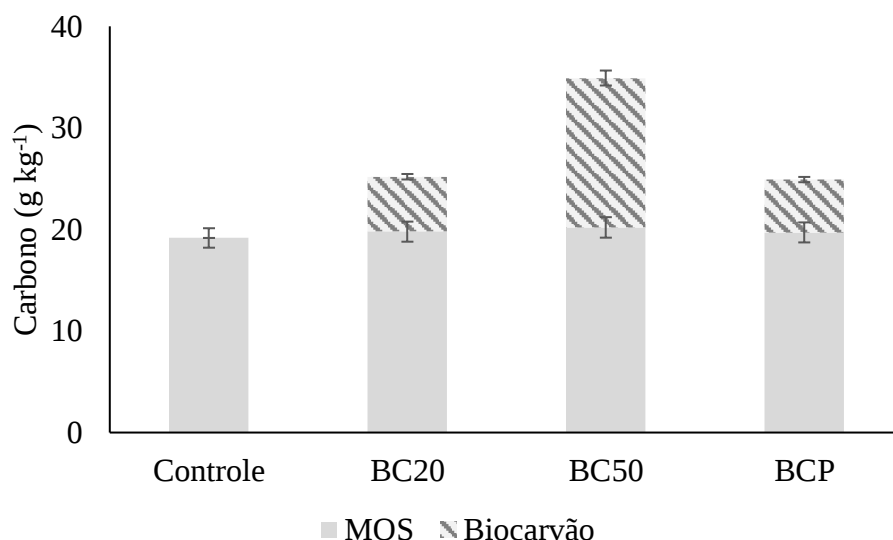


Figura 21. Contribuição e origem com carbono no teor total da camada 0,00-0,05 m conforme tratamento com biocarvão após 20 meses da aplicação. MOS = carbono oriundo da matéria orgânica do solo; Biocarvão = carbono oriundo do biocarvão acrescentado ao solo. Controle = tratamento sem BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 20 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta.

Além de não haver diferença na decomposição devido à dose de BC acrescentada, a dose parcelada, que no momento da coleta era equivalente a dose aplicada no tratamento BC20, não apresentou diferença quando comparada ao tratamento equivalente, nem no teor total de carbono encontrado e nem na contribuição de BC para o mesmo, indicando que a forma de aplicação do BC no solo (única ou parcelada) não interfere no carbono do solo.

A segunda coleta de solo para a determinação de MO ocorreu após duas safras (2016/17 e 2017 e 18) e 28 meses da aplicação de BC. Os dados referentes a esta coleta são apresentados na **Figura 22**.

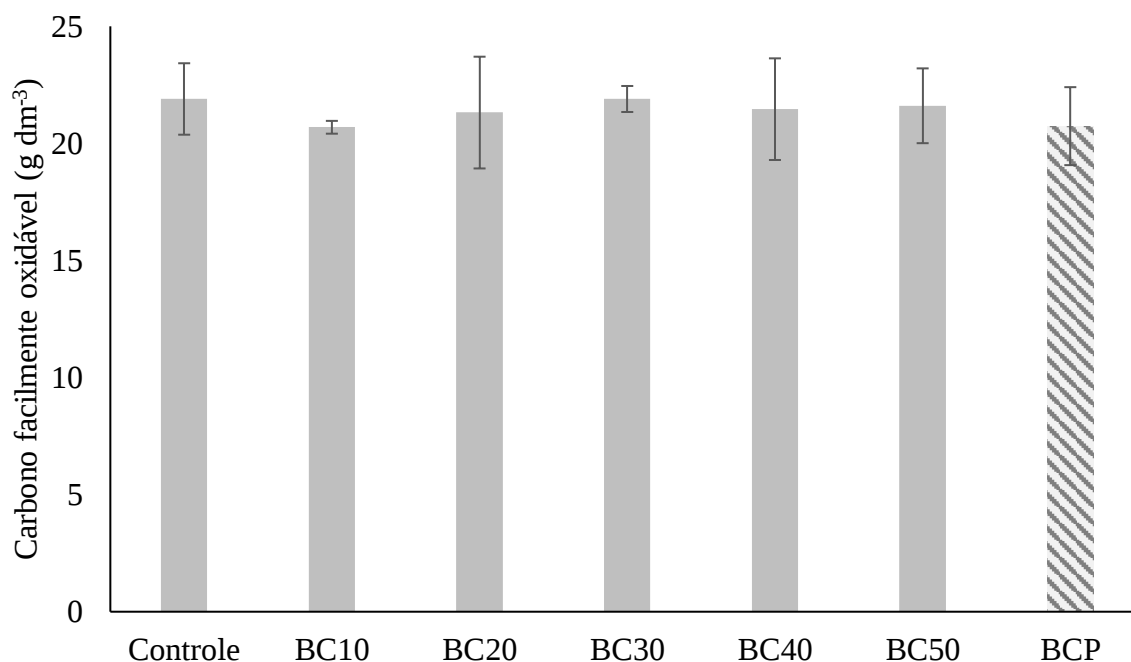


Figura 22. Teor de carbono facilmente oxidável (g dm⁻³) do solo na camada 0,00-0,20 m após a safra 2017/18 de milho conforme tratamento com biocarvão. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).

O aporte de material orgânico referente à parte aérea e raízes do milho contribuíram para o aumento no teor de C_{fo} do primeiro para o segundo ano agrícola, fazendo com que o solo atingisse o teor de MO esperado para solos argilosos (31 a 60 g dm⁻³).

Ainda relacionado aos efeitos do BC na MOS, em geral, como o biocarvão apresenta uma forma de carbono altamente recalcitrante, a tendência é que este carbono permaneça no solo, sendo apenas uma pequena parte lábil de C que pode ser utilizada nos processos microbiológicos do solo. Como apresentado anteriormente, os teores de C_{fo} baseados na análise de fertilidade do solo para a camada 0,00-0,20 m do solo foram alterados somente no primeiro ano de permanência do BC. No entanto, ao avaliar os teores totais de carbono na mesma camada do solo, em períodos de coleta referente a cada ano agrícola, podendo observar que os mesmos aumentam conforme o aumento na dose de BC (**Figura 23**).

Para entender melhor os efeitos do biocarvão no carbono do solo, as análises das camadas subdivididas de teores de carbono no solo obtidos na coleta após a primeira safra (2016/17) apresentados nas **Figuras 24 e 25** dados referentes a coleta após a segunda safra agrícola (2017/18).

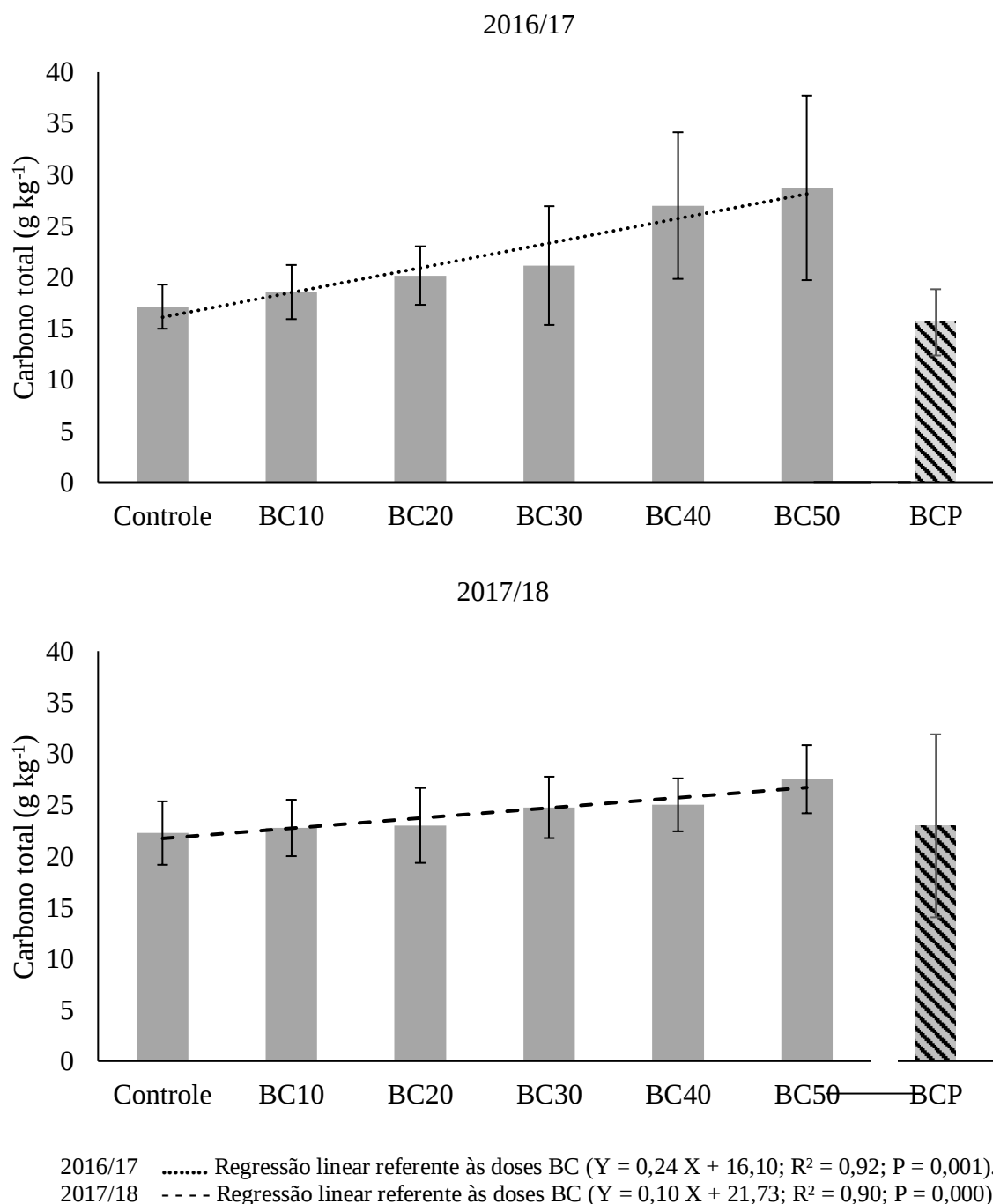
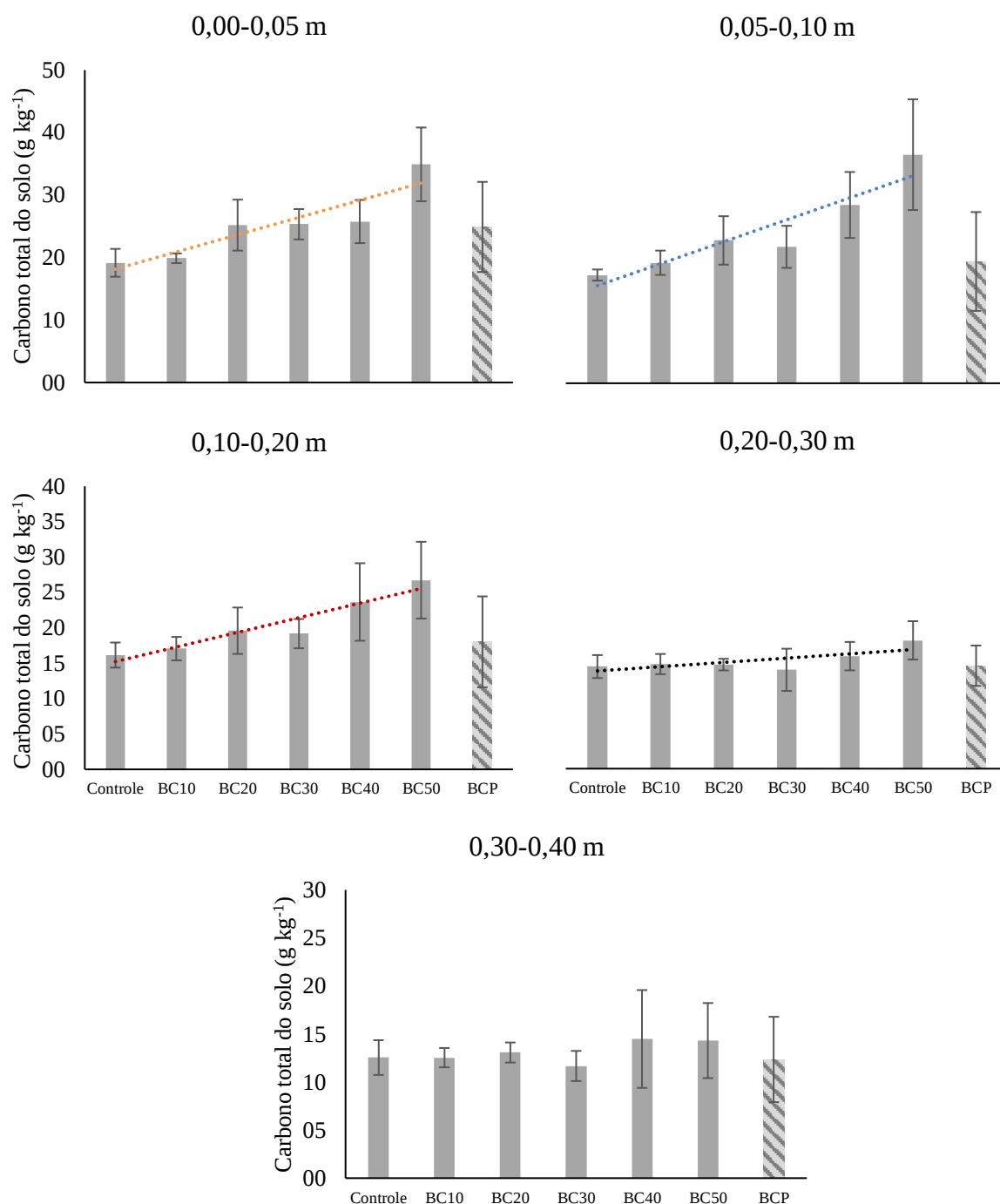
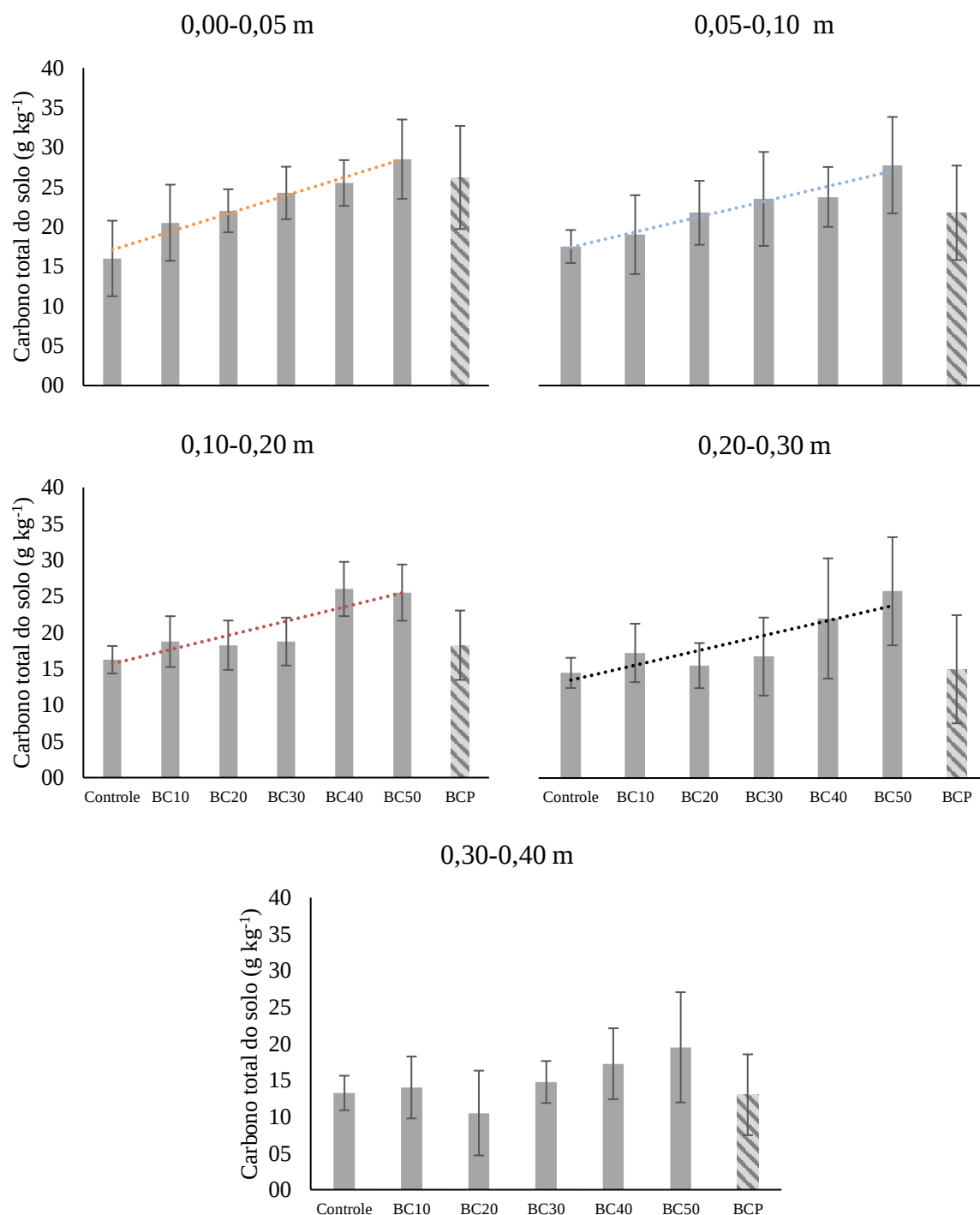


Figura 23. Carbono total (g kg^{-1}) do solo coletado na profundidade de 0,20 m após safras 2016/17 e 2017/18 conforme tratamento com biocarvão. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha^{-1} de BC; BC20 = 20 Mg ha^{-1} de BC; BC30 = 30 Mg ha^{-1} de BC; BC40 = 40 Mg ha^{-1} de BC; BC50 = 50 Mg ha^{-1} de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha^{-1} de BC, totalizando 20 Mg ha^{-1} e 30 Mg ha^{-1} de BC aplicado em 2016/17 e 2017/18, respectivamente. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).



..... Regressão linear referente às doses BC, camada 0,00-0,05 m. ($Y = 0,26 X + 18,21$; $R^2 = 0,77$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,05-0,10 m. ($Y = 0,35 X + 15,61$; $R^2 = 0,86$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,10-0,20 m. ($Y = 0,21 X + 15,23$; $R^2 = 0,91$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,20-0,30 m. ($Y = 0,06 X + 13,73$; $R^2 = 0,55$; $P = 0,006$).

Figura 24. Teores de carbono total do solo após safra de 2016/17 conforme profundidade e dose de biocarvão aplicada. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 20 Mg ha⁻¹ de BC aplicado. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).



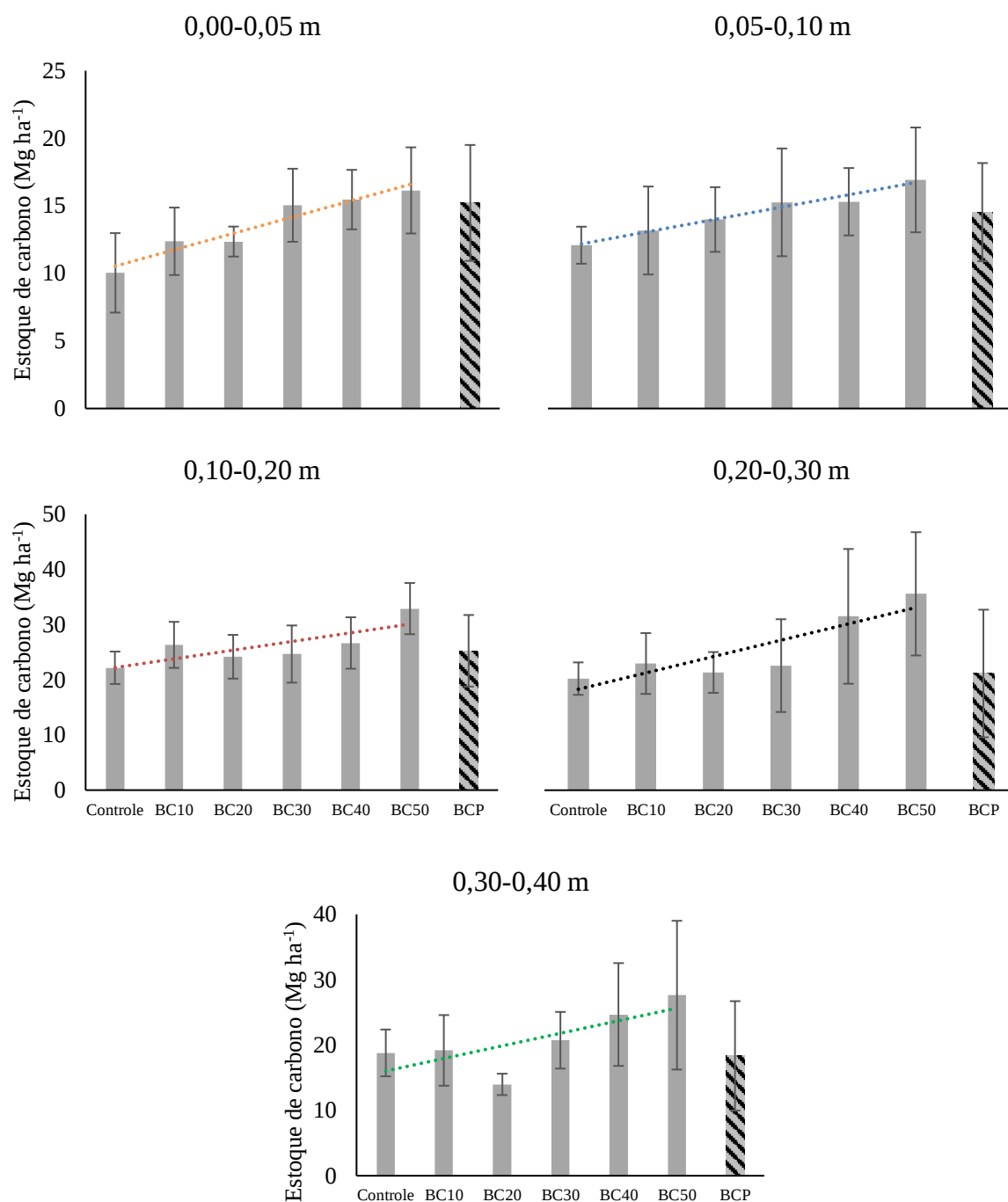
..... Regressão linear referente às doses BC, camada 0,00-0,05 m. ($Y = 0,23 X + 17,10$; $R^2 = 0,97$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,05-0,10 m. ($Y = 0,19 X + 17,41$; $R^2 = 0,96$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,10-0,20 m. ($Y = 0,20 X + 15,69$; $R^2 = 0,79$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,20-0,30 m. ($Y = 0,21 X + 13,50$; $R^2 = 0,78$; $P = 0,001$).

Figura 25. Teores de carbono total do solo após safra de 2017/18 conforme profundidade e dose de biocarvão aplicada. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC aplicado. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).

Na divisão das camadas, pode-se observar teores totais de carbono crescentes no solo conforme os tratamentos apenas em 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, tanto para as análises realizadas após a colheita do primeiro ano agrícola (**Figura 24**), como do segundo ano agrícola (**Figura 25**). Na camada 0,30-0,40 m, os teores de carbono no solo são iguais para todos os tratamentos.

Os dados adquiridos sobre a fertilidade e teores de carbono do solo indicam que houve aumento principalmente de cálcio e carbono no solo devido ao acréscimo de BC na primeira coleta (14 meses após aplicação) sendo, entre os elementos analisados, os que tiveram maiores quantidades acrescentadas ao solo (33 Mg ha⁻¹ de carbono e 1,4 Mg ha⁻¹ de cálcio). Na segunda coleta (28 meses após a aplicação), os nutrientes que se destacaram quanto à influência de BC foram o potássio e o fósforo. Como os teores dos demais nutrientes não foram alterados, nem alterando a decomposição da matéria orgânica do solo até o momento (28 meses após incorporação). Dados nutricionais e de produtividade do milho serão apresentados posteriormente para melhor avaliação da capacidade do BC em fornecer ou proporcionar melhor aproveitamento dos nutrientes minerais.

Mesmo sem grandes interferências na fertilidade e atributos físicos do solo, o aumento no estoque de carbono do solo é um dos efeitos mais garantidos com a adição de BC, primeiro pelo fato do biocarvão ter em sua composição grandes porcentagens de C (mínimo de 50% - EBC, 2012), sendo citado por PURAKAYASTHA et al. (2015) teores de carbono de 66, 64, 64 e 60% para biocarvão de milho, milheto, trigo e arroz; segundo pelo fato de que a biomassa passa por um processo de degradação termoquímica, resultando em um material mais estável e de difícil decomposição, mais resistente ao ataque microbiano. Os estoques de carbono referentes a todos os tratamentos com BC são apresentados na **Figura 26**.



..... Regressão linear referente às doses BC, camada 0,00-0,05 m. ($Y = 0,12 X + 10,55$; $R^2 = 0,93$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,05-0,10 m. ($Y = 0,09 X + 12,18$; $R^2 = 0,97$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,10-0,20 m. ($Y = 0,23 X + 21,81$; $R^2 = 0,68$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,20-0,30 m. ($Y = 0,29 X + 12,30$; $R^2 = 0,78$; $P = 0,000$).
 Regressão linear referente às doses BC, camada 0,30-0,40 m. ($Y = 0,18 X + 12,90$; $R^2 = 0,77$; $P = 0,006$).

Figura 26. Estoque de carbono (Mg ha⁻¹) referente a cada camada do solo e conforme tratamento com biocarvão após 28 meses da aplicação. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC aplicado. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).

Neste experimento, como a densidade do solo foi alterada apenas na camada 0,05-0,10 m devido ao acréscimo de BC, o que realmente interferiu no estoque de carbono do solo foi essa recalcitrância e estabilidade do material. O tratamento BCP apresentou teor superior ao tratamento Controle na camada 0,00-0,05 m e foi estatisticamente equivalente aos demais tratamentos. Nas camadas 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m o único tratamento BC50 foi superior ao tratamento BCP. Os demais tratamentos apresentaram valores equivalentes ao BCP nestas camadas. O estoque de carbono total na camada 0,00-0,40 m, determinado pela somatória das camadas subdivididas é apresentado na **Figura 27**.

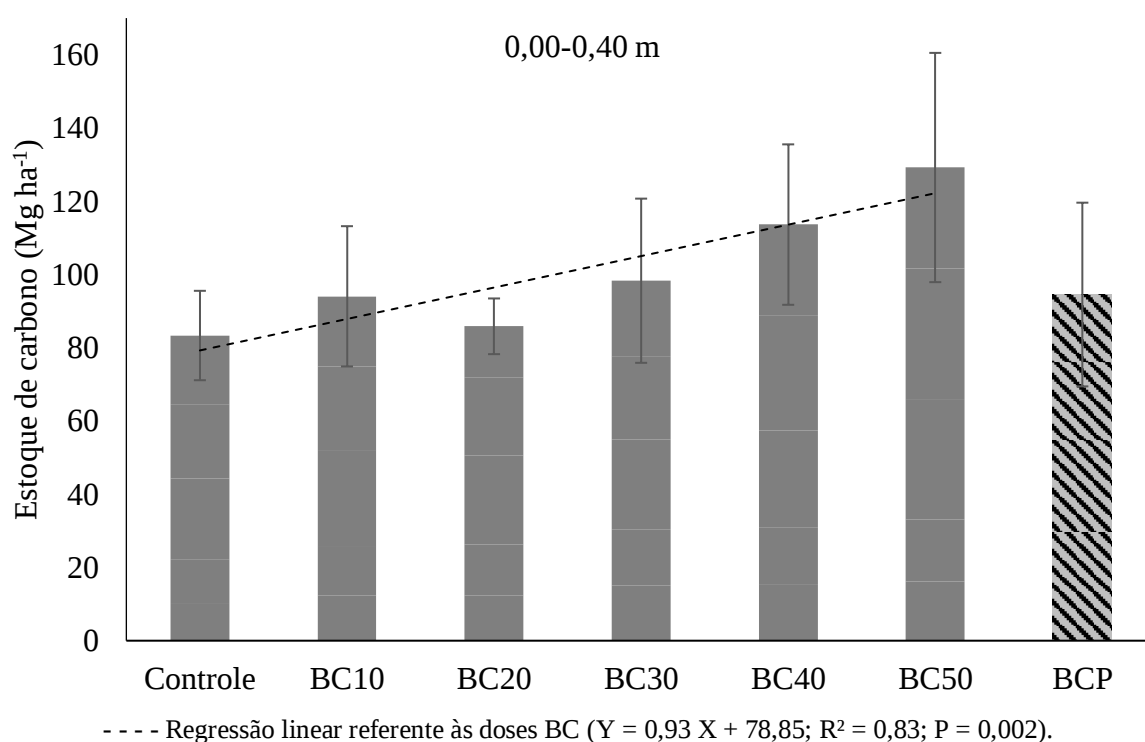


Figura 27. Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) na camada 0,00-0,40 m do solo conforme tratamento com biocarvão após 28 meses da aplicação. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha^{-1} de BC; BC20 = 20 Mg ha^{-1} de BC; BC30 = 30 Mg ha^{-1} de BC; BC40 = 40 Mg ha^{-1} de BC; BC50 = 50 Mg ha^{-1} de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha^{-1} de BC, totalizando 30 Mg ha^{-1} de BC aplicado. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).

Como também não houve efeito do BC na decomposição da MOS e dos restos culturais do milho, os maiores estoques de carbono foram encontrados nas maiores doses de biocarvão, sendo que os tratamentos BC40 e BC50 apresentaram estoques de carbono 36 e 55% superiores

ao Controle, respectivamente. Apenas o BC50 apresentou diferença em relação ao tratamento BCP, sendo estatisticamente superior a este.

Segundo VERMA et al. (2014) uma tonelada de BC com teores de carbono entre 60 e 80% é capaz de sequestrar o equivalente a 2,2 a 2,94 Mg de dióxido de carbono. Como o BC utilizado apresenta 66% de carbono em sua composição, a dose máxima aplicada seria responsável pelo sequestro de aproximadamente 110 Mg ha⁻¹ de dióxido de carbono, sendo aliado à pegada de carbono de determinados processos.

Como esta coleta que determinou o estoque de carbono ocorreu após o segundo ano agrícola, o tratamento BCP já havia recebido a terceira aplicação de biocarvão, totalizando 30 Mg ha⁻¹. Como observado na **Figura 27**, o estoque de carbono do tratamento B30 é equivalente ao do BCP, sendo as médias encontradas para cada tratamento de 98 e 95 Mg ha⁻¹ de carbono para os tratamentos BC30 e BCP, indicando que a aplicação do BC em dose única ou parcelada não interfere no estoque de carbono do solo.

5.5 Nutrição mineral e produtividade do milho

A avaliação nutricional do milho foi realizada na folha diagnóstica, com os dados referentes as duas safras, apresentados na **Figura 28**.

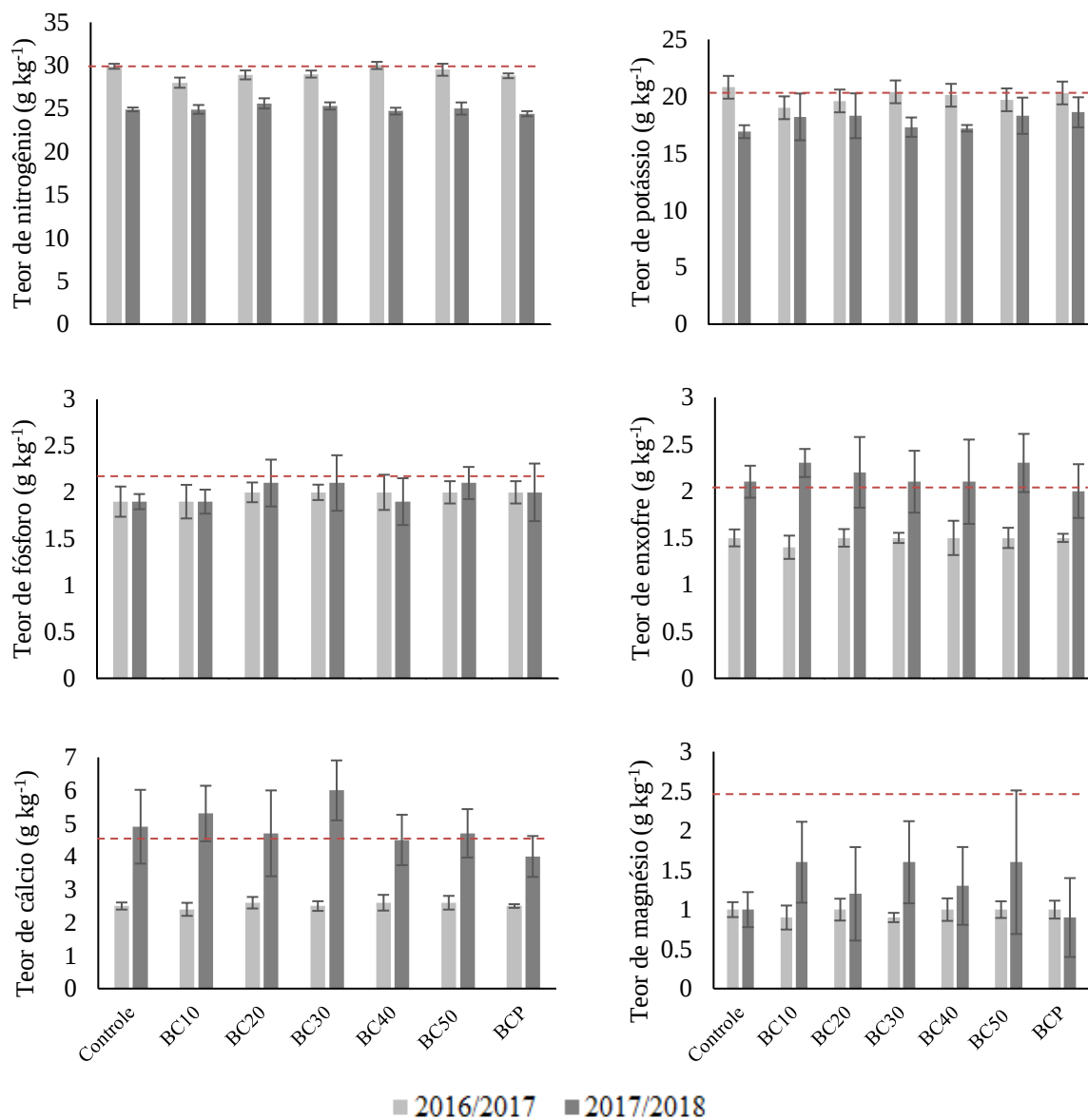


Figura 28. Teores médios de macronutrientes encontrados na folha diagnóstica do milho conforme tratamento com biocarvão e safra de milho (2016/17 e 2017/18). Nitrogênio (A); potássio (B); fósforo (C); enxofre (D); cálcio (E) e magnésio (F). Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 20 Mg ha⁻¹ e 30 Mg ha⁻¹ de BC aplicados em 2016/17 e 2017/18, respectivamente. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).

Em 2016/17, o teor de cálcio da folha diagnóstica (**Figura 28E**) ficou em torno de 2,5 g kg⁻¹, mesmo com os dados de caracterização da área experimental indicando alta concentração de Ca no solo. Este valor é baixo perto do valor encontrado em 2017/18 (cerca de 4,8 g kg⁻¹), que está de acordo com o teor ideal de Ca 4,5 g kg⁻¹ apresentado por CANTARUTTI et al. (2007). O mesmo ocorreu com o enxofre (**Figura 28D**), a folha diagnóstica apresentou teores ideais deste nutriente (2 g kg⁻¹) apenas no segundo ano agrícola, o que pode também ter favorecido a produtividade do milho.

Mesmo com a diferença entre os anos agrícolas, da mesma forma que as doses de biocarvão não interferiram nas propriedades da fertilidade do solo, produção de matéria seca ou de grãos da cultura do milho, também não houve interferência na absorção de nutrientes pelas plantas devido tratamento, incluindo o nitrogênio (**Figura 28A**).

O BC utilizado no experimento é composto por 50% de C, 0,93% de N, 0,15% de P e 0,64% de K, tendo relação C/N igual à 54. Resíduos orgânicos com relação C/N superior à 50 são considerados pobres em N, tendendo à direcionar a imobilização do mesmo, pois fazem com que os micro-organismos recorram ao N inorgânico disponível no solo para sustentar o crescimento populacional promovido pela abundância de carbono orgânico lábil. Contudo, como o biocarvão é um resíduo altamente recalcitrante, mesmo em altas doses de aplicação em solo (até 50 Mg ha⁻¹) não influenciou na disponibilidade de N para a planta, não interferindo nos teores de N absorvidos pelas mesmas (**Figura 28A**).

Resultado semelhante foi encontrado por ANDERSON et al. (2014) em experimento de campo com biocarvão e estudo da interação deste com a dinâmica do nitrogênio proveniente da urina de ruminantes. Os autores concluíram que a adição de biocarvão não interferiu na estrutura microbiana do solo e/ou na dinâmica do N, sendo estatisticamente iguais para tratamentos com e sem biocarvão. Os teores de N nas folhas diminuíram no segundo ano, fato justificado pelo aumento da produção neste mesmo ano.

Como os teores de N nas folhas diagnósticas, os de K e P (**Figuras 28B e C**) também não se relacionaram com as doses aplicadas e as médias dos tratamentos também não diferenciaram entre si. Também não houve variação dos teores encontrados na parte aérea do milho entre os anos agrícolas.

Os demais elementos que tiveram seus teores determinados (**Tabela 14**), também não apresentaram diferença de absorção dos mesmos conforme as doses de biocarvão aplicadas, sendo que o teor de boro na coleta referente a 2017/18 se aproximou mais do valor de referência (20 mg kg⁻¹) enquanto que os teores de Cu e Zn foram mais próximos dos valores de referência (9 e 20 mg kg⁻¹) na coleta referente a 2016/17.

Tabela 14. Teores médios de micronutrientes encontrados na folha diagnóstica do milho conforme tratamento com biocarvão e safra agrícola (2016/17 e 2017/18).

Tratamento	B ⁽¹⁾		Cu ⁽²⁾		Fe ⁽³⁾		Mn ⁽⁴⁾		Zn ⁽⁵⁾	
	16/17	17/18	16/17	17/18	16/17	17/18	16/17	17/18	16/17	17/18
Controle	5,3±1,1	13,2±4,3	9,7±0,6	3,3±1,0	60,0±4,9	62,7±5,8	38,9±3,6	22,6±2,4	17,9±4,5	9,1±0,5
BC10	4,9±0,9	12,6±5,3	8,2±0,9	3,6±1,1	56,0±3,7	63,5±3,1	33,8±2,9	22,3±3,7	16,1±4,3	9,5±1,8
BC20	5,4±1,3	11,9±3,7	9,2±1,2	4,7±2,2	60,0±2,1	61,3±2,0	35,0±1,8	23,7±3,7	18,2±2,1	11,0±1,9
BC30	4,9±0,9	12,3±4,1	8,7±1,5	4,4±2,6	60,0±2,1	58,5±1,2	35,5±1,9	22,4±3,7	16,8±3,4	9,8±2,1
BC40	5,9±0,8	12,6±4,7	8,8±1,1	3,3±1,0	59,0±1,9	63,2±7,2	35,0±1,9	22,8±2,7	16,1±3,8	9,3±1,7
BC50	5,4±0,8	11,5±3,2	8,8±1,7	4,6±0,8	59,0±2,1	61,2±5,8	34,0±1,9	20,2±4,1	16,9±4,1	9,0±0,8
BCP	5,4±0,6	11,7±2,9	8,9±1,0	3,4±2,2	59,0±2,1	55,0±2,9	34,3±2,1	21,1±3,0	17,2±3,8	9,0±1,0

Médias e desvio padrão (n=4). ⁽¹⁾B = boro; ⁽²⁾Cu = cobre; ⁽³⁾Fe = ferro; ⁽⁴⁾Mn = manganês; ⁽⁵⁾Zn = zinco. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC.

Como a adubação, variedade de milho, população da cultura, época de plantio e de amostragem da parte aérea e colheita dos grãos foi a mesma e o índice pluviométrico também se assemelhou nos dois anos agrícolas, a distribuição de chuvas (chuvas menos intensas, com distribuição maior ao longo do desenvolvimento do milho, como apresentado na **Figuras 29A e 29B**) e as condições climáticas para o desenvolvimento vegetal (**Figura 29C**) pode ter contribuído para a maior absorção de nutrientes e desenvolvimento da cultura no segundo ano agrícola.

Durante a segunda safra (2017/18), entre a terceira e sexta semana após o plantio do milho, fase em que a planta está em pleno desenvolvimento, as condições para que isso ocorresse eram consideradas ótimas, diferente da primeira safra que apresentou condições razoáveis e favoráveis para o desenvolvimento vegetal. No período de enchimento de grãos (a partir da 11^a semana) as condições para o desenvolvimento vegetal também foram melhores em 2017/18 que em 2016/17, diferenças que acarretaram melhor nutrição e maior produtividade em 2017/18, conforme apresentado na **Figura 30**.

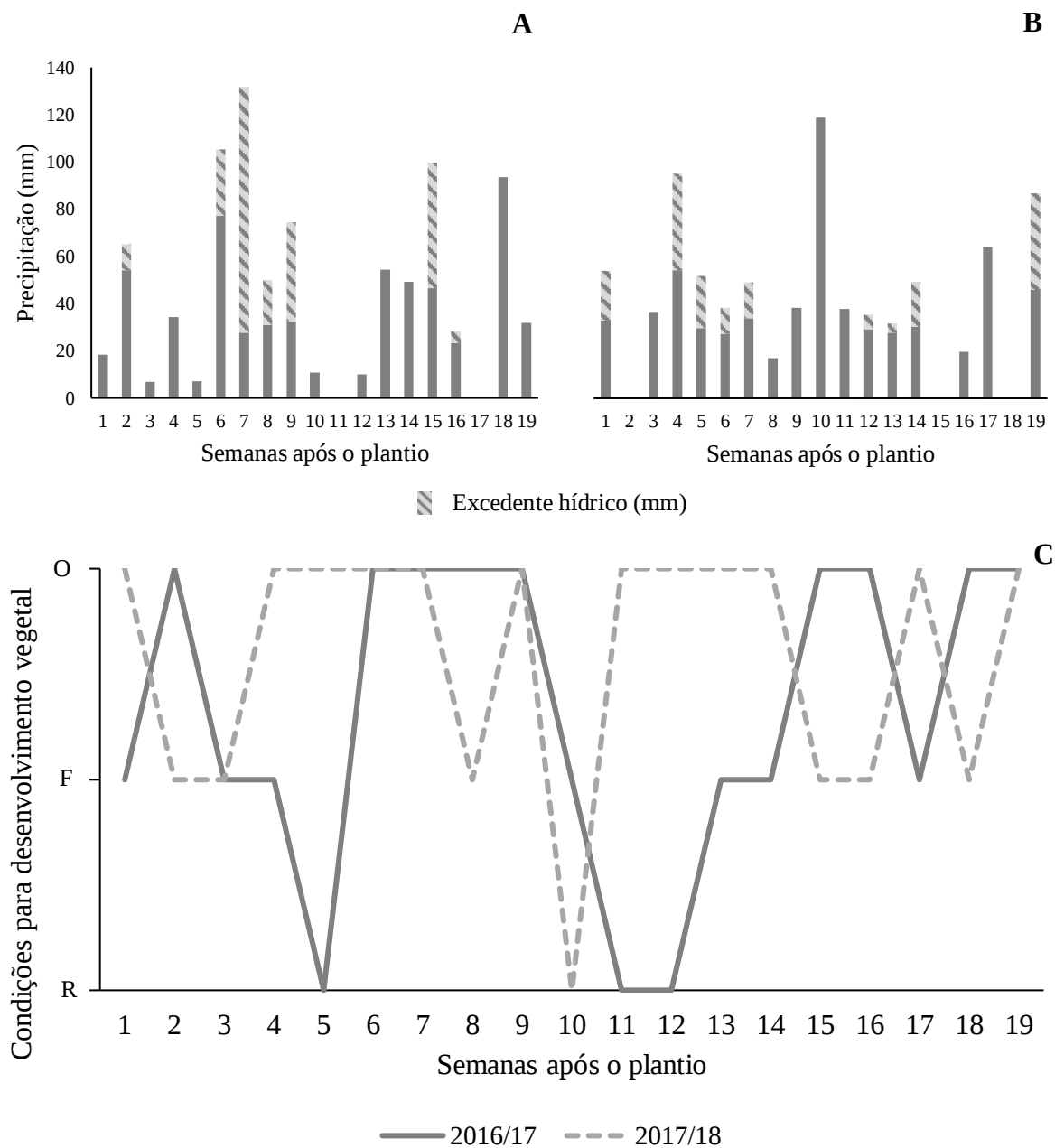


Figura 29. Precipitação e excedente hídrico semanal (mm) referentes às safras 2016/17 (A), 2017/18 (B). Condições climáticas para o desenvolvimento vegetal (C). O = ótimas condições para o desenvolvimento vegetal; F = condições favoráveis para o desenvolvimento vegetal; R = condições razoáveis para o desenvolvimento vegetal. **Fonte:** CIIAGRO, 2019.

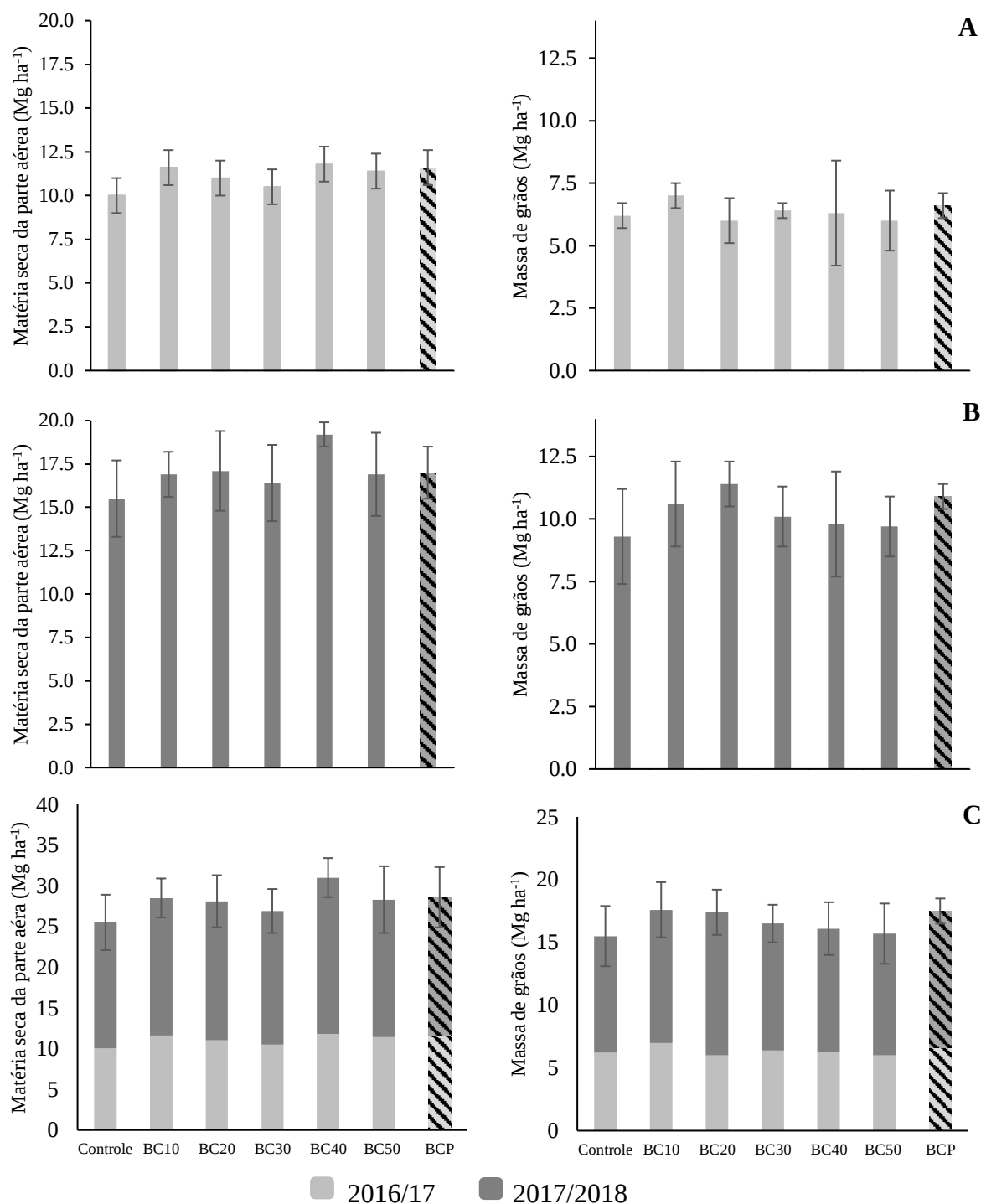


Figura 30. Produção de matéria seca (folhas e colmos) e grãos (umidade corrigida para 13%) referentes às safras 2016/17 (A), 2017/2018 (B) e acumulada nas duas safras (C) conforme tratamento com biocarvão e população de 66.000 plantas ha⁻¹. Controle = tratamento sem BC; BC10 = 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20 = 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30 = 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40 = 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50 = 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP = aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 20 Mg ha⁻¹ e 30 Mg ha⁻¹ de BC aplicado em 2016/17 e 2017/18, respectivamente. Barra de erros = Controle, BC10, BC20, BC30, BC40 e BC50 referentes ao desvio padrão de cada tratamento; BCP referente ao DMS (diferença mínima significativa) conforme teste Dunnett ($P \leq 0,05$).

Não houve aumento de produção em nenhuma das safras (2016/17 e 2017/18) conforme a dose de BC aplicada. O aumento na produção tanto de matéria seca com de grãos no segundo ano agrícola (**Figura 30**), conforme análise estatística, não está relacionado com o acréscimo de BC, já que o tratamento Controle apresentou mesmo comportamento que os demais tratamentos, sendo provável que as condições climáticas tenham favorecido o desenvolvimento da cultura no segundo ano (2017/18). O aporte de matéria orgânica devido aos restos culturais do milho foi igual em todos os tratamentos, pois a massa seca da parte aérea do milho e a produtividade da cultura (**Figura 30**) não se diferenciaram devido ao acréscimo de BC em cada safra. Não havendo diferença entre o aporte de material orgânico e nem entre o teor de MOS para amostras coletadas após a segunda safra (2017/18), pode-se admitir que o acréscimo de BC em diferentes doses não proporcionou alteração na velocidade de decomposição da matéria orgânica do solo (efeito *priming*).

Alguns autores relatam aumento da produtividade com o aumento na dose de BC incorporado ao solo, como ZHANG et al. (2012) em experimento de campo e cultivo de arroz e SILVA et al. (2011) em experimento de campo sobre Latossolo Vermelho Distrófico, textura argilosa, encontrando maior produtividade do feijoeiro comum ao acrescentar 32 Mg ha⁻¹ de BC. Mesmo com o aumento da produtividade, SILVA et al. (2011) concluíram que o efeito do biocarvão sobre os atributos químicos do solo foi abaixo do esperado, mostrando necessidade de condução de experimentos de longa duração para avaliar a evolução nas modificações químicas e físicas do biocarvão no solo, gerando informações consistentes sobre as potencialidades de uso desse material como condicionador de solo.

6. CONCLUSÃO

A adição de biocarvão de madeira após 28 meses em solo de textura argilosa pouco interferiu nos atributos químicos e físicos do solo, sendo recomendado até o momento apenas para aumentar o estoque de carbono do solo.

As pequenas diferenças devido à aplicação de BC nos valores de pH e teores de MOS, e cálcio da primeira coleta e de fósforo e potássio na segunda coleta para análise de fertilidade do solo não foram suficientes para alterar os teores de nutrientes das folhas diagnósticas, nem a produtividade do milho, indicando que o BC, após 10 (coleta referente a 2016/17) e 22 meses (coleta referente a 2017/18) de aplicação no solo, pouco interferiu na qualidade do solo e não disponibilizou os nutrientes que foram acrescidos por meio dele.

O parcelamento na aplicação do BC não diferenciou da aplicação única, sendo indicado o uso desta segunda para diminuir gastos com a aplicação e incorporação ao solo.

Como o BC é um material estável, as alterações na estrutura do BC e, consequentemente, nos atributos do solo ao longo do tempo ainda são incertas, necessitando de experimento de longo prazo, preferencialmente em campo, possibilitando interação do BC com o solo, a microbiota e raízes.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo que após 28 meses de permanência no solo o BC de madeira não tenha provocado alterações significativas nos atributos químicos e físicos do solo, acredita-se que as condições devam ser alteradas com o passar do tempo. Como o BC é um material altamente estável, é natural que as modificações demorem a aparecer. Outro fator que pode ter retardado os efeitos do BC é a textura e propriedades do solo escolhido neste experimento. No entanto, há evidências que o tempo de permanência do BC no solo podem potencializar algumas de suas propriedades, como CTC e capacidade de retenção de água. A interação da microbiota do solo com o BC também pode ocorrer de forma mais lenta. Neste experimento não foram avaliados os efeitos do BC na microbiota do solo justamente pelo fato de que, segundo literatura, diferenças significativas ocorrem podem começar a surgir após 3 anos de permanência do BC no solo. Para as propriedades químicas, a taxa de decomposição do BC ainda é incerta, mas a quebra das cadeias aromáticas em cadeias alifáticas poderia interferir na CTC do solo e, até mesmo, disponibilizar alguns nutrientes contidos no BC. Quanto as propriedades físicas do solo, apenas a interação do BC com a MOS poderia interferir, ao longo do tempo, nessas propriedades.

8. REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; ANDRADE, J.C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando solução de DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (eds) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p.240-250.
- ABREU, M.F. Extração e determinação simultânea por emissão em plasma de nutrientes e elementos tóxicos em amostras de interesse agronômico. Campinas, Tese de doutorado Universidade Estadual de Campinas, 135p. 1997.
- ABREU, M.F.; ABREU, C.A.; ANDRADE, J.C. Determinação de boro em água quente, usando aquecimento com microondas. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (eds) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p.231-239.
- AGEGNEHU, G., BASS, A. M., NELSON, P. N., AND BIRD, M. I. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Sci. Total Environ.* 543, 295–306, 2016. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.054
- AGEGNEHU, G., SRIVASTAVA, A. K., AND BIRD, M. I. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review. *Appl. Soil Ecol.* 119, 156–170, 2017. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.06.008
- ALBUQUERQUE, J.A.; SALAZAR, P.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CAMPILLO, M.C.; GALLARDO, A.; VILLAR, R. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. ***Agron. Sustain. Dev.***, 33:475-484, 2013.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. ***Meteorologische Zeitschrift***, 22: 711-728, 2013.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. Física do solo: conceitos e aplicações. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008.
- AMONETTE J.E.; JOSEPH, S. Characteristics of biochar: microchemical properties. Chapter 3. In: Lehmann J, Joseph S (eds) *Biochar for environmental management science and technology*. Earthscan, London, p. 33–52, 2009.
- ANDERSON, J. L.; BOUMA, J. Relationships between saturated hydraulic conductivity and morphometric data of an argillic horizon. ***Soil Science Society American Proceedings***, Madison, v. 37, n. 3, p. 408-413, 1973.
- ANDERSON, C.R.; HAMONTS, K.; CLOUGH, T.J.; CONDRON, L.M. Biochar does not affect soil N-transformations or microbial community structure under ruminant urine patches but does alter relative proportions of nitrogen cycling bacteria. ***Agriculture, Ecosystems & Environment***, 2014. v.191, p. 63-72. doi.org/10.1016/j.agee.2014.02.021

- ANDRADE, J.C.; ABREU, M.F. Análise química de resíduos sólidos para monitoramento e estudos agroambientais. Campinas, Instituto Agronômico, 2006. 178p.
- ANDRADE, C.A.; BIBAR, M.P.S.; COSCIONE, A.R.; PIRES, A.M.M.; SOARES, A.G. Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 50(5), 407-416, 2015. doi.org/10.1590/S0100-204X2015000500008
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, Standard Methods for the examination of water and wastewater. Washington, 2005.
- ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, Apr. 2004.
- ASAI H.; SAMSON, B.K.; STEPHAN, H.M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KYONO, Y.; INOUE, Y.; SHIRAIWA, T.; HORIE T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil Physical properties, leaf SPAD and grain yield, 2009.
- ASTM International ASTM D1762-84. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM International 1-2, West Conshohocken, 2007.
- ATKINSON, C.J.; FITZGERALD, J.D.; HIPPS, N.A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant and Soil**, v. 337, n. 1-2, p. 1–18, 2010.
- ALKHASHA, A.; AL-OMRAN, A.; ALY, A. Effects of Biochar and Synthetic Polymer on the Hydro-Physical Properties of Sandy Soils. **Sustainability**, 10 (12), 4642, 2018. doi.org/10.3390/su10124642
- BALDOCK, J.A.; SMERNIK, R.J. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. **Organic Geochemistry** v. 33, p. 1093–1109, 2002.
- BATAGLIA, O.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; FURLANI, A.M.C. & GALO, J.R. Métodos de análise química de plantas. Campinas, Instituto Agronômico. p. 31, 1978.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; CERETTA, C. A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil & Tillage Research**, v. 53, p. 95-104, 2000.
- BERNARDI, A.C.C.; MENDONÇA, F.C.; HAIM, P.G.; WERNECK, C.G.; MONTE, M.B. Disponibilidade de água e produção de arroz em função de doses de concentrado zeolítico. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 123-134, 2009.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 829-834, 2002.

- BIBAR, M.P.S. Potencial agrícola de biocarvão proveniente de biomassas alternativas. Dissertação, Campinas, Instituto Agronômico. p. 115, 2014.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade, de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura, na forma do anexo à presente em instrução normativa. INSTRUÇÃO NORMATIVA SDA Nº 35, DE 14 DE JANEIRO 2006.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Aprova os métodos analíticos oficial para análise de substratos e condicionadores de solos, na forma do anexo à presente em instrução normativa. INSTRUÇÃO NORMATIVA SDA Nº 17, DE 21 DE MAIO 2007.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Aprova os limites máximos de agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidos nos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes destinados à agricultura. INSTRUÇÃO NORMATIVA SDA Nº 7, DE 02 DE MAIO DE 2016.
- BRASSARD, P., GODBOUT, S., RAGHAVAN, V. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: key parameters and mechanisms involved. *J. Environ. Manag.* 181, 484–497, 2016. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.06.063
- BREWER, C.; UNGER, R.; SCHMIDT-ROHR, K.; BROWN, R. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. **BioEnergy Research**, v. 4, n. 4, p. 312–323, 2011.
- BRIGGS, C.; BREINER, J.M.; GRAHAM, R.C. Physical and chemical properties of *Pinus Ponderosa* charcoal: implications for soil modification. **Soil Science**, 177, pp. 263-268, 2012.
- BUSSCHER, W.J.; NOVAK, J.M.; EVANS, D.E.; WATTS, D.M.; NIANDOU, M.A.S.; AHMEDNA, M. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. **Soil Science**, 175 (1), 10-14, 2010.
- CAMARGO, F.A.C.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J. & VIDOR, C. Nitrogênio orgânico do solo. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo. Porto Alegre, Genesis, 1999. p.117-137.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Edição revisada atual. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77p. (IAC. Boletim técnico, 106).
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Determinação da matéria orgânica. in RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (eds) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p.173-180.

- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; COSCIONE, A. R.; ANDRADE, J. C. Determinação de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis em extrato de cloreto de potássio. In RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (eds) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p.213-224.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O. Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método da destilação a vapor. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Eds) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p.270-276.
- CANTARELLA, H. Matéria orgânica e nitrogênio do solo. In: BÜLL, L.T.; ROSOLEM, C.A. (Eds.) **Interpretação de análise química de solo e planta para fins de adubação**. Botucatu, Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais. 1989. p.37-74.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, SBCS, 2007. p.375-470.
- CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F.; MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F. Avaliação de fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: *Fertilidade do solo*. eds. NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. SBCS, Viçosa, 2007. pp. 769-850.
- CARVALHO, M.T.M. The impact of wood biochar as a soil amendment in aerobic rice systems of Brazilian Savannah. Thesis, University of Tasmania, Australia, 2015.
- CASE, S.D.C.; MCNAMARA, N.P.; REAY, D.S.; WHITAKER, J. The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a sandy loam soil—The role of soil aeration. **Soil Biol. Biochem**, 51, 125–134, 2012.
- CELY, P.; TARQUIS, A. M.; PAZ-FERREIRO, J.; MÉNDEZ, A.; GASCÓ, G.: Factors driving the carbon mineralization priming effect in a sandy loam soil amended with different types of biochar, *Solid Earth*, 5, 585-594, <https://doi.org/10.5194/se-5-585-2014>, 2014.
- CHAN, K.Y.; VAN ZWIETEN, L.; MESZAROS, I.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**. Canberra, v. 45, p. 629-634, 2007.
- CHENG, C.H.; LEHMANN, J.; ENGELHARD, M. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. **Geochim Cosmochim Acta** 72:1598–1610, 2008.
- CHENG, C.H.; LEHMANN, J.; THIES, J.E.; BURTON, S.D.; ENGELHARD, M.H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes, **Organic Geochemistry**, v. 37, p. 1477–1488, 2006.
- CIIAGRO – Centro integrado de informações agrometeorológicas. Disponível em: <www.ciiagro.sp.gov.br> acessado em maio de 2019.

- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução no 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. 32p, 2006
- CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.777-788, 2005.
- COSTA, M.L.D.; KERN, D.C.; PINTO, A.H.E.; SOUZA, J.R.D.T. The ceramic artifacts in archaeological black earth (terra preta) from Lower Amazon region, Brazil: Mineralogy. *Acta Amazonica* 2004, 34, 165–178.
- COSTA, M.L. & KERN, D.C. Geochemical signatures of tropical soils with archaeological black earth in the Amazon, Brazil. *J. Geochem. Explor.*, v. 66, p. 369-385. 1999.
- CROSS, A. & SOHI, S.P, The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. *Soil Biology and Biochemistry*, v.43, p. 2127-2134, 2011. doi:10.1016/j.soilbio.2011.06.016.
- DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. Water retention and storage. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Eds) *Methods of soil analysis. Part 4. SSSA book Ser. 5* Soil Science Society of America, Amdson, WI, pp 671-796, 2002
- DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: *Fertilidade do solo*. eds. NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. SBCS, Viçosa, 2007. pp. 91-133.
- DEMPSTER, D.N.; GLEESON, D.B.; SOLAIMAN, Z.M.; JONES, D.L.; MURPHY, D.V. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. **Plant Soil**, 354, 311–324, 2012.
- DIJKERMAN, J.C. Field description, morphology and sampling of soils. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands, 1981.
- DOMINGUES, R.R.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, C.A.; MELO, I.C.N.A.D.; MELO, L.C.A.; MAGRIOTIS, Z.M. Properties of biochar derived from wood and high- nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *Plos One*. 2017; 12(5): doi.org/10.1371/journal.pone.0176884
- DONG, L.; ZHANG, H.; WANG, L.; YU, D.; YANG, F.; SHI, X.; SALEEM, H.; AKHTAR, M.S. Irrigation with sediment-laden river water affects the soil texture and composition of organic matter fractions in arid and semi-arid areas of Northwest China, *Geoderma*, v. 328, p. 10-19, 2018. ISSN 0016-7061, doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.002.
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. & LOPES, P.P. Soil water retention curve. SWRC, version 3.00. Piracicaba, 2001.

- DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical Properties of Biochar. In: Lehmann, J.; Joseph, S (ed.). *Biochar for enviromental management: Science and Technology*. 1. Londres: Earthscan, 416p. 2009
- EBC - European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. 2012. <http://www.europeanbiochar.org/en/download>. Version 6.3E of 14th August 2017, DOI: 10.13140/RG.2.1.4658.7043
- FAO. **Wood Energy**. Rome, Italy. 2016.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v.35, 2001.
- FUNGO, B., LEHMANN, J., KALBITZ, K., THIONGO, M., OKEYO, I., TENYWA, M. Aggregate size distribution in a biochar-amended tropical Ultisol under conventional hand-hoe tillage. *Soil Tillage Res.* 165, 190–197, 2017. doi: 10.1016/j.still.2016.08.012
- GASKIN, J.W.; STEINER, C.; HARRIS, K.; DAS, K.C.; BIBENS, B. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Trans Asabe*, 2008. v. 51. p.2061–2069
- GASKIN, J.W.; SPEIR, R.A.; HARRIS, K.; DAS, K.C.; LEE, R.D.; MORRIS, L.A.; FISHER D.S. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agron J*, 2010. v. 102. p. 623–633
- GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—A review. *Biol. Fertil. Soils* 2002, 35, 219–230.
- GUPTA, U.C. Micronutrientes e elementos tóxicos em plantas e animais. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B.V. *Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura*. Jaboticabal, CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001.
- GURWICK, N. P., MOORE, L. A., KELLY, C., ELIAS, P. A systematic review of biochar research, with a focus on its stability in situ and its promise as a climate mitigation strategy. *PLoS ONE* 8:e75932, 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0075932
- IBGE – Instituto brasileiro de geografia e estatística: Produção da extração vegetal e da silvicultura, 2017.
- IBI – International biochar initiative: Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil, 2015. Disponível em: <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>.
- JONES, D.; ROUSK, J.; EDWARDS-JONES, G.; DELUCA, T.; MURPHY, D. Biocharmediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 45, p. 113-124, 2012.

- KAMMANN, C.; LINSEL, S.; GÖßLING, J.; KOYRO, H.-W. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil–plant relations. *Plant and Soil*, v. 345, n. 1-2, p. 195–210, 2011.
- KARHU, K.; MATTILA, T.; BERGSTRÖM, I.; REGINA, K. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study. **Agric. Ecosyst. Environ.**, 140, 309–313, 2011.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy, 1965. v.1, p.499-509.
- KIM, K.H., KIM, J.Y., CHO, T.S.; CHOI, J.W. (2012) Influence of Pyrolysis Temperature on Physicochemical Properties of Biochar Obtained from the Fast Pyrolysis of Pitch Pine (*Pinus rigida*). *Bioresource Technology*, 118, 158-162. doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.094
- KNICKER, H.; GONZÁLEZ-VILA, F.J.; GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, R. Biodegradability of organic matter in fire-affected mineral soil of Southern Spain. *Soil Biol.Biochem.* 56, 31-39. 2013.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.
- KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. UPF, 212p, 2008.
- KRULL, E.S.; BALDOCK, J.A.; SKJEMSTAD, J.O.; SMERNIK, R.J. Characteristics of biochar: Organo-chemical properties. IN: LEHMANN, J.; JOSEPH, S., eds. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, London: Earthscan, 2009. p.67-84.
- LAIRD, D.; FLEMING, B.Q.; WANG, R.H.; KARLEN, D. et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, v. 158, n. 3-4, p. 436–442, 2010.
- LAGHARI, M., NAIDU, R., XIAO, B., HU, Z., MIRJAT, M. S., HU, M. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. *J. Sci. Food Agric.* 96, 4840–4849, 2016. doi: 10.1002/jsfa.7753
- LEHMANN, J. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5: 129: 381-387, 2007.
- LEHMANN, J. A handful of carbon. **Nature**, 447: 143-144, 2007.
- LEHMANN, J.; DA SILVA, J.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343– 357, 2003.

- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.) Biochar for Environmental Management: Science and Technology, Earthscan, London, pp. 1-12, 2009.
- LEHMANN, J.; RILLIG, M.C.; THIES, J.; MASIELLO, C.A.; KOCKADAY, W.C.; CROWLEY, D. **Biochar effects on soil biota – a review**. Soil Biol. Biochem., 2011.v.43, pp. 1812-1836.
- LEHMANN, J.; RONDON, M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. In: Uphoff NT et al (eds) Biological approaches to sustainable soil systems. CRC/Taylor & Francis, Boca Raton, pp 517–530, 2006.
- LIANG, F.; LI, G.; LIN, Q.; ZHAO, X. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil. Journal of Integrative Agriculture, Beijing, v. 13, p. 525-532, 2014.
- LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J.O.; THIES, J.; LUIZÃO, F.J.; PETERSEN, J.; NEVES E.G. **Black carbon increases cation exchange capacity in soils** Soil Science Society of America Journal, v.60, p. 1719-1730, 2006.
- LIU, P.; LIU, W.J.; JIANG, H.; CHEN, J.J.; LI, W.W.; YU, H.Q. Modification fo bio-char derived from fast pyrolysis of biomass and its application im removal of tetracycline from aqueous solution. **Bioresource Technology** 121, p 235-241, 2012.
- LIBARDI, V.C.M, COSTA, M. B. Consumo d'água da cultura do trigo (*Tricutum aestivum*, l.) Revista da FZVA. Uruguaiana, v. 4, n. 1, p. 16-23. 1997.
- MADARI, B.E.; COSTA, A.R. da; CASTRO, L.M. de; SANTOS, J.L.S.; BENITES, V. de M.; ROCHA, A. de O.; MACHADO, P.L.O. de A. Carvão Vegetal como condicionador de solo para Arroz de Terras Altas (Cultivar Primavera): um estudo prospectivo. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão. 06 p. 2006. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado Técnico, 125)
- MANGRICH, A.S.; MAIA, C.M.B.F.; NOVOTNY, E.H. Biocarvão - As terras pretas de índios e o sequestro de carbono. Revista Ciência Hoje, p.47-48, 2011.
- MARKS, E.A.N.; ALCANIZ, J.M.; DOMENE X. **Unintended effects of biochars on short-term plant growth in a calcareous soil** Plant and Soil, v.385, p. 87-105, 2014.
- MÉNDEZ, A.; GÓMEZ, A.; PAZ-FERREIRO, J.; GASCÓ, G. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. **Chemosphere**, v. 89, n. 11, p. 1354–9, 2012.
- MÉNDEZ, A.; TARQUIS, A.; SAA-REQUEJO, A.; GUERRERO, F.; GASCO, G. Influence of pyrolysis temperature on composted sewage sludge biochar priming effect in a loamy soil. **Chemosphere**, 93, 668– 676, 2013.
- MORAGUES-SAITUA, L.; ARIAS-GONZÁLEZ, A.; GARTZIA-BENGOETXEA, N. Effects of biochar and wood ash on soil hydraulic properties: A field experiment involving contrasting temperate soils. Geoderma, v. 305, p. 144-152, 2017.

- MORALES, M.M. Efeito do biocarvão sobre o comportamento da matéria orgânica e do fósforo em solo degradado. 2010. xi, 75 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2010.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. **Variação das propriedades químicas e físicas do solo e na matéria orgânica em agroecossistemas da Amazônia Ocidental (Amazonas)**. Piracicaba: CENA/USP, 2002. 79p.
- MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 3, p. 313– 339, 2013. doi:10.3390/agronomy3020313.
- MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. **Geoderma**, v. 193-194, p. 122– 130, 2013.
- MUNERA-ECHEVERRI, J.L.; MARTINSEN, V.; STRAND, L.T.; ZIVANOVIC, V.; CORNELISSEN, G.; MULDER, J. Cation exchange capacity of biochar: An urgent method modification. *Science of The Total Environment*. v. 642, p. 190-197, 2018. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.017
- NAIR, V.; NAIR, K.R.P.; DARI, B.; FREITAS, A. & CHATTERJEE, N.; PINHEIRO, F. Biochar in the Agroecosystem–Climate-Change–Sustainability Nexus. *Frontiers in Plant Science*. 8, 2017. doi:10.3389/fpls.2017.02051.
- NELISSEN, V.; SAHA, B.K.; RUYSSCHAERT, G.; BOECKX, P. Effect of different biochar and fertilizer types on N₂O and NO emissions. **Soil Biol. Biochem.** 70, 244–255, 2014.
- NOVAK, J. M.; BRUSSCHER, W.J.; LAIRD, D.L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D.W.; NIANDOU, M.A.S. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. **Soil Science**, v. 174, n. 2, p. 105–112, 2009.
- NOVAK, J.M.; BUSSCHER, W.J.; WATTS, D.W.; AMONETTE, J.E.; IPPOLITO, J.A.; LIMA, I.M.; GASKIN, J.; DAS, K.C.; STEINER, C.; AHMEDNA, M.; et al. Biochars impact on soil-moisture storage in an ultisol and two aridisols. *Soil Sci.* 177, 310–320, 2012.
- NOVOTNY, E.H.; HAYES, M.H.B.; MADARI, B.E.; BONAGAMBA, T.J.; AZEVEDO, E.R.; SOUZA, A.A.; SONG, G.; NOGUEIRA, C.M.; MANGRICH, A.S. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon region for the utilisation of charcoal for soil amendment. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 20(6), 1003-1010, 2009. dx.doi.org/10.1590/S0103-50532009000600002
- OUYANG, L.; WANG, F.; TANG, J.; YU, L.; ZHANG, R. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. **J. Soil Sci. Plant Nutr**, v.4. p. 991- 1002, 2013.
- PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; SILVA, M. A. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, M. T., MARIMON JR, B. H.; PACHECO, L. P. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.5, p.699-706, 2012.

- PINHEIRO, P. C. C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Biomassa & Energia**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p. 159-168, 2005.
- PIETIKÄINEN, J.; KIIKKILÄ, O.; FRITZE, H. Charcoal as a Habitat for Microbes and Its Effect on the Microbial Community of the Underlying Humus. **Oikos**, v. 89, n. 2, p. 231-242, 2000.
- PLAZA, C.; GIANNETTA, B.; FERNÁNDEZ, J.M.; LÓPEZ-DE-SÁ, E.G.; POLO, A.; GASCÓ, G.; MÉNDEZ, A.; ZACCONE, C. Response of different soil organic matter pools to biochar and organic fertilizers. **Agriculture Ecosystems & Environment**, 225, p. 150-159, 2016.
- PURAKAYASTHA, T.J.; DAS, K.C.; GASKIN, J.; HARRIS, K.; SMITH, J.L.; KUMARI, S. Effect of pyrolysis temperatures on stability and priming effects of C3 and C4 biochars applied to two different soils. *Soil and Tillage Research*. v. 155, pp 107-115, 2016. doi.org/10.1016/j.still.2015.07.011.
- QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Determinação do pH em cloreto de cálcio e da acidez total. in RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (eds) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. p.181-188.
- RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. & FURLANI, A. M. (eds). *Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo*. Boletim Técnico IAC n. 100. Campinas. IAC, 285p, 1996.
- RAIJ, B. Van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.
- REED, E. Y.; CHADWICK, D. R.; HILL, P. W.; JONES, D. L. Critical comparison of the impact of biochar and wood ash on soil organic matter cycling and grassland productivity. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 110, p. 134-142, 2017.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ci. Amb.**, 27:29-48, 2003.
- RIAZ, M.; ROOHI, M.; ARIF, M.S.; HUSSAIN, Q.; YASMEEN, T.; SHAHZAD, T.; SHAHZAD, S.M.; MUHAMMAD, H.F.; ARIF, M.; KHALID M. Corncob-derived biochar decelerates mineralization of native and added organic matter (AOM) in organic matter depleted alkaline soil. **Geoderma**, 294, p. 19-28, 2017
- RITTL, T.F.; NOVOTNY, E.H.; BALIEIRO, F.C.; HOFFLAND, E.; ALVES, B.J.R.; KUYPER, T.W. Negative priming of native soil organic carbon mineralization by oilseed biochars of contrasting quality. **European Journal of Soil Science**, 66, 714– 721, 2015.

- ROZANE, D.E.; CENTURION, J.F.; ROMUALDO, L.M.; TANIGUCHI, C.C.K.; TRABUCO, M.; ALVES, A.U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um latossolo vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Biosci. J., Uberlândia**, v. 26, n. 1, p. 24-32, 2010.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. Revisada e expandida. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SCHULZ, H.; GLASER, B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 175, 410-422, 2015. [dx.doi.org/10.1002/jpln.201100143](https://doi.org/10.1002/jpln.201100143)
- SCHMIDT, M.W.I.; SKJEMSTAD, J.O. Carbon isotope geochemistry and nanomorphology of soil black carbon: black chernozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning. **Global Biogeochemistry Cycles**, Mainz, v. 16, p. 1123, 2002.
- SILVA, J. S.; BERBERT, P. A.; RUFATO, S.; AFONSO, A. D. L. Indicadores da qualidade dos grãos. In: SILVA, J. S. Secagem e armazenamento de produtos agrícolas. 2º ed., Viçosa, p. 63-107, 2008.
- SILVA, M. A. S., MADARI, B. E., CARVALHO, M. T. M., VERNARDES, T. G., SOUZA, R. O., OLIVEIRA, F. B. Efeito da aplicação de biochar sobre propriedades químicas do solo e produtividade de feijoeiro comum irrigado. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2011.
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 7-31, 2004.
- SOHI, S.P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A review of biochar and its use and function in soil. **Advances in Agronomy**, 105: 47-82, 2010.
- SOHI, S.; LOPEZ-CAPEL, E.; KRULL, E.; BOL, R. Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. **CSRIO Land and Water Science Report** 05/09, 64 p. 2009.
- SONG, W.; GUO, M. Quality Variations of Poultry Litter Biochar Generated at Different Pyrolysis Temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 94, p. 138-145, 2012. doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018
- STEINER, C.; TEIXEIRA, W.G.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and Amazonian dark earths in Central Amazonia – preliminary results. In: GLASER, B.; WOODS, W.I. (Ed.). **Amazonian dark earths; explorations in space and time**. New York: Springer, p.195-212, 2004.
- STEINER, C.; BLUM, W.E.H.; ZECH, W.; DE MACEDO, J.L.V.; TEIXEIRA, W.G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant Soil**. v. 291, p. 275-290, 2007.

- SUBEDI, R.; KAMMANN, C.; PELISSETTI, S.; TAUPE, N.; BERTORA, C.; MONACO, S.; GRIGNANI, C. Does soil amended with biochar and hydrochar reduce ammonia emissions following the application of pig slurry? **European Journal of Soil Science**, v. 66, p. 1044-1053, 2015.
- TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (ed) Manual de métodos de análises do solo. 3 ed revisada e ampliada, Brasília: Embrapa, 2017. 573p.
- THIES, J. E.; RILLING, M.C. Characteristics of Biochar: Biological Properties (Chapter 6). In: LEHMANN, J., JOSEPH, S., eds. Biochar for environmental management: science and technology. London: Earthscan; p. 85-102, 2009.
- TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.301-309, 1998.
- TRYON, E. H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. **Ecological Monographs**, v. 18, p. 81-115, 1948.
- TROEH, F.R.; THOMPSON, L.M. Soils and Soil Fertility. Sixth Edition, Blackwell, Ames, Iowa, 489. 2005
- UCHIMIYA, M.; LIMA, I.M.; KLASSON, K.T.; WARTELLE, L.H. Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: roles of natural organic matter. **Chemosphere**, v. 80, n. 8, p. 935–40, 2010.
- VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; DOWNIE, A.; BERGER, E.; RUST, J.; SCHEER, C. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol. **Australian Journal of Soil Research**. 48. p. 555–568, 2010.
- VARNER, R.K.; KELLER, M.; ROBERTSON, J.R.; DIAS J.D.; SILVA H.; CRILL, P.M.; MCGRODDY, M.; SILVER W.L. Experimentally induced root mortality increased nitrous oxide emission from tropical soils. **Geophysical Research Letters**, 29 p.1-7, 2002.
- VERHEIJEN, F.G.A.; JONES, R.J.A.; RICKSON, R.J.; SMITH, C.J. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. **Earth-Science Reviews** 94(1-4): 23-38, 2009.
- VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S.L.; BASTOS, A.C.; VAN DER VELDE, M.; DIAFAS IASON. Biochar Application to Soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. **JCR Scientific and Technical Reports**. 166p, 2010.
- VERMA, M.; FRIEDL, M. A.; RICHARDSON, A. D.; KIELY, G.; CESCATTI, A.; LAW, B. E.; WOHLFAHRT, G.; GIELEN, B.; ROUPSARD, O.; MOORS, E. J.; TOSCANO, P.; VACCARI, F. P.; GIANELLE, D.; BOHRER, G.; VARLAGIN, A.; BUCHMANN, N.; VAN GORSEL, E.; MONTAGNANI, L.; PROPASTIN, P. Remote sensing of annual terrestrial gross primary productivity from MODIS: an assessment using the FLUXNET La Thuile data set, **Biogeosciences**, 11, 2185-2200, , 2014. doi.org/10.5194/bg-11-2185-2014

- WATERS, D.; VAN ZWIETEN, L.; SINGH, BHUPINDER-PAL; DOWNIE, A.L.; COWIE, A.L.; LEHMANN, J. Biochar in soil for climate change mitigation and adaptation. **Soil Health and Climate Change**, v.29, p.345-368, 2011.
- WANG, J., XIONG, Z., AND KUZYAKOV, Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy* 8, 512–523, 2016. doi: 10.1111/gcbb.12266
- WENG, Z.H.; VAN ZWIETEN, L.; SINGH, B.P.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; COWIE, A.; MACDONALD, L.M. Plant-biochar interactions drive the negative priming of soil organic carbon in an annual ryegrass field system. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 90, p. 111-121, 2015. ISSN 0038-0717, doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.08.005.
- YARGICOGLU, E.N.; SADASIVAM, B.Y.; REDDY, K.R.; SPOKAS, K. Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars. *Waste Manage.* 36, 256–268, 2015.
- YOUSAF, B.; LIU, G.; ABBAS, Q.; ULLAH, H.; WANG, R.; ZIA-UR-REHMAN, M; AMINA; NIU, Z. Comparative effects of biochar-nanosheets and conventional organic-amendments on health risks abatement of potentially toxic elements via consumption of wheat grown on industrially contaminated-soil, **Chemosphere**, 2018, **192**, 161
- YUAN, J.-H.; XU, R.-K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 110–115, 2011.
- ZANETTI, M.; CAZETTA, J.O.; MATTOS JÚNIOR, D.; CARVALHO, S.A. Influência do extrato pirolenhoso na calda de pulverização sobre o teor foliar de nutrientes em Limoeiro ‘Cravo’. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 26, p. 529-533, 2004.
- ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGEMBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T.M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v.79, p.117-161, 1997.
- ZHANG, A.F.; CUI, L.Q.; PAN, G.X.; LI, L.Q.; HUSSAIN, Q.; ZHANG, X.H.; ZHENG, J.W.; CROWLEY, D. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. **Agric Ecosyst Environ** 139:469–475, 2010.
- ZHANG, A.; BIAN, R.; PAN, G.; CUI, L.; HUSSAIN, Q.; LI, L.; ZHENG, J.; ZHENG, J.; ZHANG, X.; HAN, X.; YU, X. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles. **Field Crops Res** 127:153–160, 2012.
- ZHANG, A.; LIU, Y.; PAN, G.; HUSSAIN, Q.; LI, L.; ZHENG, J.; ZHANG, X. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. **Plant Soil** 351:263–275, 2012.

- ZHAO, X., WANG, J., WANG, S., AND XING, G. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: a pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil. *Plant Soil* 378, 279–294, 2014. doi: 10.1007/s11104-014-2025-9
- ZIMMERMAN, A.R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). **Environmental Science and Technology**, v. 44, p. 1295–1301, 2010.
- ZIMMERMAN, A.R.; BIN GAO; MI-YOUN AHN. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 43, n.6, p. 1169-1179, 2011. doi:10.1016/j.soilbio.2011.02.005.

9. ANEXOS

ANEXO 1. Teores semi totais de nutrientes no solo na camada 0,00-0,20 m em tratamentos com diferentes doses de biocarvão após 14 meses da aplicação.

Parâmetro		Tratamento						CV%	Regressão			Tratamento BCP	CV%	DMS
		Controle	BC10	BC20	BC30	BC40	BC50							
P⁽¹⁾	mg kg ⁻¹	339	168	202	142	199	192	62,99	ns			176	60,28	230
K⁽²⁾	mg kg ⁻¹	50,6	47,6	59,6	59,7	59,6	74,6	27,25	Y = 0,45 X + 47,49	R ² = 0,78	P = 0,034	53,7	27,79	30,3
Ca⁽³⁾	mg kg ⁻¹	529	605	588	559	713	788	15,61	Y = 4,55 X + 516,53	R ² = 0,73	P = 0,002	462	17,10	195
Mg⁽⁴⁾	mg kg ⁻¹	120	117	127	124	151	153	25,01	ns			114	26,02	63

*Teores semi totais: obtidos por análise US-EPA 3051. Significativo, $p \leq 0,05$; ns: não significativo ($p > 0,05$). DMS: diferença mínima significativa calculada pelo teste de Dunnett. ⁽¹⁾P: fósforo; ⁽²⁾K: potássio; ⁽³⁾Ca: cálcio; ⁽⁴⁾Mg: magnésio. Controle: tratamento sem BC; BC10: 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20: 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30: 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40: 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50: 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP: aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 20 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta.

ANEXO 2. Atributos de fertilidade do solo médios na camada 0,20-0,40 m em tratamentos com diferentes doses de biocarvão após 14 meses da aplicação.

Parâmetro		Controle	Tratamento					CV%	Regressão		Tratamento BCP	CV%	DMS
			BC10	BC20	BC30	BC40	BC50						
MOS	g dm ⁻³	18,5	18,3	17,3	16,3	18,5	18,3	14,91	ns		18,3	15,58	5,24
pH		4,8	5,0	5,0	4,8	4,9	4,9	4,81	ns		4,9	4,51	0,41
P	mg dm ⁻³	9,5	8,8	7,3	11	11,3	14,0	29,87	Y = 0,096X + 7,88	R ² = 0,59 P = 0,019	7,8	29,83	5,57
K	mmolc dm ⁻³	2,1	1,7	2,1	2,1	2,2	2,0	28,92	ns		1,8	29,52	1,10
Ca	mmolc dm ⁻³	16	20	18	15	19	19	21,91	ns		17	20,61	6,73
Mg	mmolc dm ⁻³	5	6	6	5	5	5	17,56	ns		5	16,38	1,63
CTC	mmolc dm ⁻³	52	54	51	48	53	53	10,50	ns		52	10,27	10,01
V	%	46	51	49	45	49	49	11,26	ns		48	10,81	9,76

Significativo, $P \leq 0,05$; ns: não significativo ($p > 0,05$). DMS: diferença mínima significativa calculada pelo teste de Dunnett ($P \leq 0,05$). ⁽¹⁾MOS: matéria orgânica do solo; ⁽²⁾P: fósforo; ⁽³⁾K: potássio; ⁽⁴⁾Ca: cálcio; ⁽⁵⁾Mg: magnésio; ⁽⁶⁾ CTC: capacidade de troca de cátions; ⁽⁹⁾V: saturação por bases. Controle: tratamento sem BC; BC10: 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20: 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30: 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40: 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50: 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP: aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta.

ANEXO 3. Atributos de fertilidade do solo médios na camada 0,00-0,20 m em tratamentos com diferentes doses de biocarvão após 28 meses da aplicação.

Parâmetro		Tratamento						CV%	Regressão	Tratamento BCP	CV%	DMS
		Controle	BC10	BC20	BC30	BC40	BC50					
MOS⁽¹⁾	g dm ⁻³	34,8	33,8	35,5	32,5	33,5	35,0	6,67	ns	33,3	7,21	4,58
pH		4,7	4,6	4,7	4,7	4,5	4,7	2,65	ns	4,8	2,63	0,23
P⁽²⁾	mg dm ⁻³	7,0	6,8	5,8	7,3	6,8	9,0	33,10	ns	6,0	37,88	4,94
K⁽³⁾	mmolc dm ⁻³	1,9	2,0	2,1	2,6	2,2	2,3	18,60	ns	2,1	17,63	0,71
Ca⁽⁴⁾	mmolc dm ⁻³	24	23	22	23	22	24	12,57	ns	23	12,52	5,39
Mg⁽⁵⁾	mmolc dm ⁻³	6	6	6	6	5	7	13,28	ns	6	12,57	1,31
CTC⁽⁶⁾	mmolc dm ⁻³	66	65	63	65	68	68	9,71	ns	61	9,67	11,84
V⁽¹⁰⁾	%	48	48	48	49	44	48	9,78	ns	48	10,39	9,32

Significativo, $P \leq 0,05$; ns: não significativo ($P > 0,05$). DMS: diferença mínima significativa calculada pelo teste de Dunnett ($P \leq 0,05$). ⁽¹⁾MOS: matéria orgânica do solo; ⁽²⁾P: fósforo; ⁽³⁾K: potássio; ⁽⁴⁾Ca: cálcio; ⁽⁵⁾Mg: magnésio; ⁽⁶⁾ CTC: capacidade de troca de cátions; ⁽⁹⁾V: saturação por bases. Controle: tratamento sem BC; BC10: 10 Mg ha⁻¹ de BC; BC20: 20 Mg ha⁻¹ de BC; BC30: 30 Mg ha⁻¹ de BC; BC40: 40 Mg ha⁻¹ de BC; BC50: 50 Mg ha⁻¹ de BC; BCP: aplicação anual de 10 Mg ha⁻¹ de BC, totalizando 30 Mg ha⁻¹ de BC no momento da coleta.